

"Zandsuppletie op het strand van de Kop van Goeree,  
uitgevoerd met behulp van de zogenaamde "Punaise"."

Afstudeerverslag van	A.H. van Berk
Technische Hogeschool Delft	
Afdeling	Civiele Techniek
Vakgroep	(Kust)waterbouwkunde
Begeleider	Ir. R. Reinalda

Met dank aan de medewerkers van;

- de Rijks Geologische Dienst te Haarlem
  - de diverse diensten van Rijkswaterstaat
  - de Technische Hogeschool Delft
  - het Waterloopkundig Laboratorium de Voorst,
- die mij behulpzaam waren bij het verzamelen van meetgegevens en literatuur, bij wie ik met mijn vragen terecht kon en die mij waardevolle suggesties hebben gedaan en daarmee een bijdrage hebben geleverd aan mijn afstudeerwerk.

Delft, april 1985





## INHOUD

	pagina
0. SAMENVATTING	
0.1. Inleiding	5
0.2. Morfologische ontwikkelingen	6
0.3. Veiligheid van de duinen	7
0.4. Opsporing wingebieden	7
0.5. Werkomstandigheden	8
0.6. De aanzanding van de winput	9
0.7. Conclusies	9
0.8. Nader onderzoek	10
1. ALGEMENE INLEIDING	11
2. KOP VAN GOEREE	
2.1. Inleiding	13
2.2. Morfologische ontwikkelingen	13
2.3. De invloed van de afdammingen van de estuaria	14
2.4. Maatregelen die in het verleden zijn getroffen	16
2.5. Studies die in het verleden zijn gedaan	17
2.6. Waarom een studie naar een zandsuppletie met de "punaise" ?	19
3. DE VEILIGHEID VAN DE DUINENRIJ OP DE KOP VAN GOEREE	
3.1. Inleiding	
3.1.1. Algemeen	21
3.1.2. Achtergronden	21
3.1.3. Overzicht van de uitgevoerde berekeningen	22
3.2. Rekenpeil	24
3.3. Golfhoogte en -richting op diep water	
3.3.1. Golfhoogte	25
3.3.2. Golfrichting	25
3.4. Keuze van de raai	26

	pagina
3.5. Bepaling van de rekenwaarde van de golfhoogte voor duinafslag	
3.5.1. Berekening van de reductie van de golfhoogte t.g.v. de zandbank	2 6
3.5.2. Golfopzet	2 8
3.5.3. Rekenwaarde voor de golfhoogte	2 9
3.6. Rekenwaarde voor de valsnelheid van duinzand in zeewater	3 0
3.7. Achteruitgang van de duinen	
3.7.1. Het afslagprofiel	3 1
3.7.2. Duinvoet na stormvloed	3 2
3.7.3. Afslaglijn volgens waarnemingen	3 2
3.7.4. De correctie op de afslaglijn voor profielfluctuaties	3 3
3.7.5. Extra verschuiving van de afslaglijn ten gevolge van langstransportverschillen tijdens stormvloed	3 4
3.7.6. Ontwerpafslaglijn	3 5
3.8. Grensprofiel	3 6
3.9. Veiligheid van de duinen	3 6
4. OPSPORING WINGEBIEDEN	
4.1. Inleiding	3 7
4.2. Transportberekeningen	3 7
4.3. Kuberingen	3 9
4.4. Vergelijking berekeningen en kuberingen	4 1
4.5. Andere wingebieden	4 2
5. BEOORDELING WINGEBIEDEN	
5.1. Inleiding	4 4
5.2. Werkomstandigheden die de keuze van het wingebied beïnvloeden	
5.2.1. Afstand winput tot het stort	4 4
5.2.2. Bereikbaarheid van de winput	4 5
5.2.3. Aanzanding van de winput	4 6

	pagina
5.2.4. Aanzanding en/of erosie van de kust	4 7
5.2.5. Stabiliteit van de winput en omgeving	4 8
5.2.6. Invloed op het milieu	4 8
5.2.7. Metingen in de put	4 8
5.2.8. Korreldiameters en slibgehalte in de winput	4 9
5.2.9. Benodigd aantal verplaatsingen van het werktuig	5 4
5.2.10. Energievoorziening	5 4
5.2.11. Vervuiling wingebieden	5 4
5.2.12. Gevaar/hinder door ankerdraden en leidingen	5 5
5.2.13. Golfklimaat en stroomsnelheden bij het werktuig en de leidingen	5 6
5.2.14. Verankeringsmogelijkheden	5 6
5.2.15. Afmetingen van de winput	5 7
5.3. Keuze van het wingebied	5 8
6. AANZANDING VAN DE WINPUT IN WINGEBIED A	
6.1. Inleiding	6 0
6.2. Zandtransporten in wingebied A	
6.2.1. Bijkerformule voor zandtransport	6 1
6.2.2. Ingevoerde waarden voor de parameters	6 5
6.2.3. Berekende zandtransporten	7 0
6.3. Stromingsbeeld in de winput	
6.3.1. Mogelijke modellen voor geulen	7 3
6.3.2. Vergelijking van het computerprogramma ODYSSEE met het model VXCST	7 7
6.3.3. Berekende stroombeelden in de winput	8 1
6.4. Aanzanding van de winput	
6.4.1. Methode van Boeters	8 6
6.4.2. Uitbreiding van het model van Boeters	9 4
6.4.3. Berekende aanzanding van de winput	9 8
6.4.4. Bespreking resultaten	10 3
7. CONCLUSIES	11 3

	pagina
8. NADER ONDERZOEK	115
LITERATUURLIJST	116
LIST VAN FIGUREN	118

## 0. Samenvatting

### 0.1 Inleiding

In 1981 is bij de vakgroep Grondverzet van de afdeling Werktuigbouwkunde van de T.H. Delft een baggerwerktuig ontworpen, dat in ondiep water zand kan winnen. In dit rapport is nagegaan of dit werktuig met de naam "punaise" kan worden ingezet bij de voorgenomen zandsuppletie ('84) op de Kop van Goeree. (fig. 1 en 2)

Om inzicht te krijgen in de gesteldheid van het werkgebied zijn de morfologische ontwikkelingen van het kustgebied van Goeree in de delta van Zuid-West Nederland bestudeerd. Tevens is de invloed van de afdammingen van het Haringvliet ('71) en het Brouwershavensche Gat ('72) op deze ontwikkelingen in beschouwing genomen.

Daarna is aan de hand van de "Leidraad" (lit. 8) de veiligheid van de duinen op de Kop van Goeree als waterkering berekend. Daarmee zouden de noodzaak en de omvang van de zandsuppletie kunnen worden bepaald. Op grond van de leidraad echter bleek een zandsuppletie uit veiligheidsoverwegingen niet noodzakelijk. De duinbeheerder heeft vermoedelijk op andere gronden tot een zandsuppletie besloten. In het vervolg is dan ook uitgegaan van het hiervoor opgestelde bestek. (lit.11)

Vervolgens is naar potentiële wingebieden gezocht, waar de punaise in principe kan worden ingezet. Deze wingebieden moesten binnen een afstand van 10 km van de Kop van Goeree liggen, omdat verwacht wordt, dat de uitvoering met de punaise tot die afstand nog concurrerend is met een conventionele uitvoering. Tevens moesten de wingebieden van nature aanzanden, zodat de inzet van de punaise de zandbewegingen in het kustgebied van Goeree zo min mogelijk zou verstoren en dit zo min mogelijk nadelige gevolgen voor de kust zou hebben. Dit onderzoek leverde vier mogelijke wingebieden op.

De werkomstandigheden in de wingebieden zijn vergeleken, zodat een voorkeur voor één van de wingebieden kon worden uitgesproken. Om echter een verantwoorde keuze te doen is onder andere een gedetailleerd grondonderzoek noodzakelijk. Dat gaat de mogelijkheden van dit afstudeerrapport echter te boven.

Voor het gekozen wingebied is een berekening gemaakt van de aanzanding van een gezogen put. Daarmee kan worden vastgesteld hoe lang het duurt eer de oorspronkelijke situatie is hersteld.

Tenslotte wordt geconcludeerd dat er binnen een afstand van 10 km van de Kop van Goeree op meerdere plaatsen voldoende zand kan worden gewonnen met de punaise voor een zandsuppletie op Goeree. Voorwaarde is dan wel, dat het zand zodanig grof is, dat het op het stort blijft liggen en niet met het spuitwater wegvloeit. Een grondonderzoek moet hierover uitsluitsel geven. De kosten van een zandsuppletie met de punaise moeten eveneens worden onderzocht om te toetsen of deze uitvoeringswijze inderdaad kan concurreren met een conventionele uitvoering.

## 0.2 Morfologische ontwikkelingen

In eerste instantie is in grote lijnen het ontstaan van de delta van Zuid-West-Nederland geschetst. (fig. 1) Meer in het bijzonder is ingegaan op de morfologische ontwikkelingen van het kustgebied van Goeree. Daaruit bleek dat de Kop van Goeree reeds voor de afdammingen van het Haringvliet ('71) en het Brouwershavensche Gat ('72) erodeerde. Daarom werd de duinenrij aldaar versterkt ('65).

Na de afdammingen van de hierbovengenoemde estuaria bleek de geul Het Schaar (fig. 7) geleidelijk te verdiepen en dichter naar de kust te verschuiven. Het strand en de duinen werden hierdoor steeds meer bedreigd. In afwachting van de verdere ontwikkelingen werden in '71 en '73 kleine zandsuppleties uitgevoerd.

Om het door de duinbeheerder gehanteerde "minimum suppletieprofiel" te handhaven, bleken in '77 en '84 wederom zandsuppleties noodzakelijk. Daarnaast werd overwogen de geul Het Schaar met een zanddam te sluiten. Vandaag de dag is deze oplossing niet meer aan de orde vanwege de daarmee gemoeide hoge investeringskosten, terwijl de onderhoudskosten van een dergelijke dam nagenoeg gelijk zijn aan de kosten van regelmatige zandsuppleties (lit. 6).

### 0.3 Veiligheid van de duinen

Door de T(echnische) A(dviescommissie) voor de W(aterkeringen) is een rekenmethode opgesteld waarmee snel een inzicht kan worden verkregen in de veiligheid van de duinen als waterkering. (lit. 8) Als de veiligheid van de duinen op de Kop van Goeree bekend is, dan zouden de noodzaak en de omvang van een zandsuppletie aldaar kunnen worden vastgesteld.

De belangrijkste parameters (REKENWAARDEN) die bij de rekenmethode worden gehanteerd, zijn: het R(eken) P(eil) (= de stormvloedstand), de golfhoogte, de valsnelheid van het duinzand in zeewater en het bestaande kustprofiel.

Met name het vaststellen van de rekenwaarde van de golfhoogte bleek moeilijk. De oorzaak hiervan is de zandbank de "Ooster", waarop de golven breken alvorens het strand te bereiken. (fig. 5) Dit probleem is opgelost door de golfhoogte te bepalen met een rekenmodel van Battjes en Janssen voor de dissipatie van golfenergie door breking. (lit. 9)

De berekeningen volgens de leidraad resulteren uiteindelijk in een afslaglijn, waarop de positie van het afslagpunt P (= de duinvoet na stormvloed) in de tijd staat weergegeven. (fig. 27) Omdat de rekenmethode strikt genomen voor rechte kusten geldt en niet voor sterk gekromde kusten als Goeree, is de afslaglijn over een bepaalde afstand landwaarts verschoven. Het resultaat is dat de verwachtingswaarde voor de bezwijkfrequentie van de duinenrij van Goeree tot na het jaar 2000 kleiner is dan  $10^{-5}$ /jr.

Op grond van de rekenmethode van de T.A.W. is een zandsuppletie uit veiligheidsoverwegingen dus niet noodzakelijk. De duinbeheerder tracht echter het door hem gedefinieerde minimum suppletieprofiel te handhaven. Om dit te realiseren is besloten om in het najaar van '84 een zandsuppletie van  $850.000 \text{ m}^3$  uit te voeren op de Kop van Goeree. (lit. 11)

### 0.4 Opsporing wingebieden

Ten behoeve van de bovenvermelde zandsuppletie zijn wingebieden gezocht. Deze wingebieden moesten op een afstand van minder dan 10 km van het stort liggen. Verwacht wordt dat de uitvoering van een zandsuppletie met de punaise binnen deze afstand nog kan concurreren met een conventionele



uitvoering. De wingebieden mochten echter niet zo dicht onder de kust liggen, dat strand en duinen bij het zuigen zouden worden ondermijnd. Een tweede eis was, dat de wingebieden van nature moeten aanzanden. Verwacht wordt, dat als in zo'n wingebied een put zou worden gezogen, deze dan ook weer snel vol zou lopen. De zandbewegingen in het kustgebied van Goeree zouden dan zo min mogelijk worden verstoord en de eventuele nadelige gevolgen voor de kust zouden beperkt blijven.

In de brekerzone zijn de aanzandings- en erosiegebieden gelokaliseerd met behulp van de door Svasek berekende zandtransporten door golven. (lit. 4) Buiten de brekerzone is hetzelfde gedaan met behulp van de door Bakker en Speekenbrink berekende zandtransporten. (lit. 5), aangedreven door getijstromen. Daar waar golf- en getijtransporten bij elkaar kwamen, zijn de effecten opgeteld. Uit dit onderzoek volgden vier wingebieden, waarvan er twee te dicht onder de kust lagen.

Een andere methode die is gehanteerd om aanzandingsgebieden op te sporen, is het vergelijken van lodingkaarten van verschillende jaren. Door de toename in bodemhoogte die op verschillende plaatsen werd vastgesteld, kon de aanzanding daar worden berekend. Dit onderzoek leverde vier wingebieden A, B, C en D op. (fig. 39)

De wingebieden, zoals gevonden met de eerste (modelmatige) methode, hadden slechts een beperkte overeenkomst met de wingebieden, gevonden met de tweede (empirische) methode. Omdat de empirische methode betrouwbaarder werd geacht dan de modelmatige, is de studie voortgezet met de wingebieden zoals gevonden met de empirische methode.

#### 0.5 Werkomstandigheden

Zestien verschillende werkomstandigheden in de wingebieden zijn voor zover mogelijk, vergeleken om een keuze uit de vier wingebieden te kunnen doen. Daar de gegevens over stroomsnelheden, bodemprofielen en breshellingen die onder invloed van golven ontstaan bij het zuigproces, ontbreken, is de voorkeur voor één van de wingebieden (wingebied A, fig. 39) ontleend aan de overige werkomstandigheden..



## 0.6 De aanzanding van de winput

Eerder (in 0.4) werd al gesteld dat de wingebieden van nature moeten aanzanden, opdat een gezogen put zo snel mogelijk vol zou lopen. Daarom is een berekening gemaakt van de verwachte aanzanding van een winput in het gekozen wingebied.

Daartoe is het model van Boeters (lit. 20), dat de aanzanding in een gebaggerde sleuf beschrijft, uitgebreid en gehanteerd. Omdat het model alleen opging voor de aanzanding op dalende taluds en de erosie op stijgende taluds, is het model uitgebreid met de aanzanding op stijgende taluds. Daarmee kan de volledige aanzanding en erosie in een winput worden beschreven.

Eén van de parameters in het model van Boeters is de stroomsnelheid in de winput. Voor de berekening van de stroomsnelheden en -richtingen in een onder een hoek aangestroomde oneindig lang veronderstelde sleuf zijn verschillende modellen bekend. Op grond van literatuuronderzoek is voor een eenvoudig model gekozen, dat zo goed mogelijk aansluit bij de Goereese situatie.

De toepassing van dit eenvoudige model leek verantwoord, omdat de uitkomsten van dit model, vergeleken met die van het zeer betrouwbaar geachte computermodel ODYSSEE, in een gebaggerde sleuf behoudens de koppen geen significante verschillen lieten zien. Bij de berekening van de stroomsnelheden en -richtingen in de winput zijn de uiteinden van de winput dan ook verwaarloosd.

Tenslotte is met het uitgebreide model van Boeters de aanzanding van een 10 m diepe winput met taludhellingen van 1 : 10, gezogen in wingebied A, berekend. Daaruit bleek dat de winput afhankelijk van de ribbelhoogte in 2 tot  $3\frac{1}{2}$  jaar zal vollopen.

## 0.7 Conclusies

Aan het eind van de studie worden de volgende conclusies getrokken:

- De duinenrij op de Kop van Goeree vormt op grond van de "Leidraad"

(lit. 8) vooralsnog een goede waterkering. De verwachtingswaarde voor de bezwijkfrequentie is kleiner dan  $10^{-5}$ /jr. Aangenomen mag worden dat dit tot na het jaar 2000 zo zal blijven, vooropgesteld dat de zandbank de "Ooster" (fig. 5) blijft bestaan.

- Achter de zandbank de "Ooster" treedt in 4 afzonderlijke gebieden (fig. 39) van nature voldoende aanzanding op om eens in de acht jaar één miljoen  $m^3$  zand te winnen voor een zandsuppletie op Goeree zonder dat dit nadelige gevolgen zal hebben voor de veiligheid van de duinenrij op de Kop van Goeree.
- Met het uitgebreide model van Boeters kan op eenvoudige (handmatige) wijze een redelijk inzicht verkregen worden in het verloop van de aanzanding van een winput en de hersteltijd waarin de oorspronkelijke situatie vrijwel hersteld zal zijn. Dit ondanks de beperkingen die een handmatige berekening oplegt en de onvolkomenheden van het model.
- Door de inzet van de punaise in het ondiep gelegen wingebied A ( $\approx$  NAP - 3,0 m) (fig. 39) kan nu en ook in de toekomst de Kop van Goeree door zandsuppletie worden onderhouden.

#### 0.8 Nader onderzoek

De beslissing om de punaise in te zetten in één van de opgespoorde wingebieden kan pas verantwoord worden genomen, nadat de volgende onderzoeken zijn gedaan:

- Gedetailleerd onderzoek van de bodemprofielen in de wingebieden om te kunnen bepalen of het aldaar te winnen zand grof genoeg is ( $D_{50} > 150 \mu m$ , lit. 13) om te worden gebruikt voor een zandsuppletie op de Kop van Goeree.
- Onderzoek naar de kosten van de uitvoering van een zandsuppletie op de Kop van Goeree met de punaise om te toetsen of de uitvoering met de punaise inderdaad concurrerend is met een conventionele uitvoering zoals (in 0.4) is verondersteld.

## 1. ALGEMENE INLEIDING

Dit rapport is (het eerste deel van) het afstudeerverslag van A.H. van Berk. In dit rapport zal worden nagegaan of de zogenaamde "punaise" kan worden ingezet bij een voorgenomen zandsuppletie op de Kop van Goeree.

De punaise is een als afstudeerwerk bij de vakgroep Grondverzet van de afdeling Werktuigbouwkunde van de T.H. Delft ontworpen baggerwerktuig. De zogenaamde punaise (fig. 0) bezit enige bijzondere eigenschappen:

- het werktuig is onbemand en wordt op afstand bediend.
- het werktuig kan zand persen over een afstand van ca. 700 m.
- het werktuig kan in ondiep water met brekende golven werken.
- het werktuig heeft een beperkte pompcapaciteit.
- het werktuig kan concurreren met conventionele werktuigen indien de afstand winput-stort kleiner is dan 10 kilometer.
- het werktuig is afzinkbaar.

Voor dit werktuig is een werkgebied gezocht waar het zijn bijzondere eigenschappen zou kunnen bewijzen. De eroderende Kop van Goeree is in het najaar van '84 aangevuld met 880.000 m<sup>3</sup> zand. In dit rapport is onderzocht of dit met het bovengenoemde werktuig had kunnen worden uitgevoerd.

Om inzicht te krijgen in de gesteldheid van het werkgebied is in hoofdstuk 2 de morfologische ontwikkeling van het kustgebied van Goeree, alsmede de invloed van de Deltawerken daarop beschreven.

In hoofdstuk 3 is met de nieuwe methode voor de berekening van de duinafslag, zoals opgesteld door de T.A.W., berekend hoe lang de verwachtingswaarde van de bezwijfrequentie van de duinenrij van Goeree kleiner dan 10<sup>-5</sup>/jr. zal zijn. Uit het oogpunt van veiligheid blijkt een strandsuppletie niet noodzakelijk.

Omdat het duinprofiel in '84 verder landinwaarts lag dan het "minimumprofiel" dat de duinbeheerder onderhoudt, is in het najaar van '84 de strandsuppletie uitgevoerd. Met het oog op de bijzondere eigenschappen van het werktuig werden ten behoeve van de strandsuppletie enkele

wingebieden opgespoord. Deze opsporing, die in hoofdstuk 4 wordt behandeld, verliep enerzijds via transportberekeningen en anderzijds via kuberingen. Uit kuberingen van het kustgebied van Goeree volgden vier geschikte wingebieden.

In hoofdstuk 5 zijn de werkomstandigheden die de keuze van het wingebied bepalen vergeleken. Op basis van beschikbare gegevens is een voorlopige keuze voor één wingebied gedaan.

De aanzanding van de winput is één van de belangrijkste werkomstandigheden die de keuze van het wingebied beïnvloeden. In hoofdstuk 6 is hiervoor een rekenmodel opgezet en voor het voorlopig gekozen wingebied uitgewerkt.

Het rapport wordt besloten met de conclusies in hoofdstuk 7 en de aanbevelingen in hoofdstuk 8.

## 2. KOP VAN GOEREE

### 2.1. Inleiding

Alvorens in te gaan op de uitvoering van de zandsuppletie op de Kop van Goeree is in paragraaf 2.2. beschreven hoe het kustgebied van Goeree zich heeft ontwikkeld.

De afdammingen van het Haringvliet in 1971 en het Brouwershavensche Gat in 1972 (fig. 1) en maatregelen op Goeree zelf hadden invloed op deze ontwikkelingen. Dit wordt in paragraaf 2.3. en 2.4. behandeld.

In paragraaf 2.5. komen verschillende studies, naar de zandtransporten in het kustgebied van Goeree, naar de mogelijke maatregelen om de erosie van de Kop van Goeree tegen te gaan en naar de snelheid van die erosie, die in het verleden zijn gedaan, aan de orde.

Tot besluit wordt in paragraaf 2.6. aangegeven waarom juist een strandsuppletie met de punaise is onderzocht.

### 2.2. Morfologische ontwikkelingen (lit. 1)

Het zeegebied rond de Kop van Goeree maakt deel uit van de delta van Zuid-West Nederland (fig. 1 en 2). De delta is ontstaan door het samenspel van getij, wind en golven toen de estuaria (Brouwershavensche Gat en Haringvliet) nog in open verbinding met de zee stonden.

Twee maal per dag stroomden de estuaria vol met opkomend water en leeg met vallend water. In de richting van de zee werden de estuaria wijder, waardoor de snelheid van de ebstroom verminderde. (fig. 3a) Het meegevoerde zand kon dan in de monding bezinken, waardoor deze ondieper werd. (fig. 3b) De ebstroom zocht zich een uitweg door deze ondiepte door daarin een geul uit te slijten. (fig. 3c) Door de geringe stroomsnelheden op de oevers ter weerszijden van zo'n geul kon het bezinkingsproces daar gewoon doorgaan. Uiteindelijk kwamen de oevers boven water en vergroeiden met het vaste land. (fig. 3d) De monding van het estuarium verplaatste zich zo

steeds verder naar de zee.

De zandbank de "Ooster" (fig. 4) is op bovenbeschreven wijze ontstaan. Voor de afdammingen van het Haringvliet ('71) en het Brouwershavensche Gat ('72) was de Ooster een nog onder water liggende oever van twee ebgeulen. (fig. 4)

Zeewaarts van de NAP -10,00 m-lijn loopt en liep een getijgolf van zuidwest naar noordoost. Deze hield verdere uitbouw van de delta tegen. (fig. 1) In de diepe zee was de voortplantingssnelheid van deze golf groter dan in het deltagebied.

Dichterbij de kust varieerden de voortplantingssnelheden met de diepte. Hierdoor ontstonden faseverschillen in het verticale getij in het deltagebied. Als gevolg van het zo opgebouwde verhang tussen de ondiepe en diepe delen in het Deltagebied ontstonden zogenaamde kortsluitgeulen. Zo is de geul het "Schaar" voor de Kop van Goeree ontstaan. (fig. 5)

Door de winden uit overwegend westelijke richtingen werd zand door de golven langs de "Ooster" in de richting van het Haringvliet c.q. Slijkgat getransporteerd. (fig. 6) In die richting nam ook de kracht van de golven af, zodat het meegevoerde zand daar kon bezinken.

Doch de ebstroom uit het Haringvliet nam het zand weer op en voerde het terug naar de "Ooster". Op de ondiepe delen van de "Ooster" namen de stroomsnelheden weer af en kon het aangevoerde zand opnieuw bezinken.

Behalve langs de banken transporteerden de golven ook zand over de banken. (fig. 6) De inhoud van de banken was voor de afdammingen van de estuaria in dynamisch evenwicht met golven en getij.

### 2.3. De invloed van de afdammingen van de estuaria

Door de afdammingen van de estuaria is het bergingsvolume hiervan vrijwel geheel verdwenen. De uitstroming bij vallend water is daardoor sterk afgenomen. De invloed van de getijstrooming op zee voor de stromingen in de delta is toegenomen. Voor de afdammingen ver-



hinderde deze getijstrooming de verdere uitbouw van de delta. (2.1.) Nu echter houdt hij de uitbouw niet alleen tegen, maar dringt hij de delta zelfs terug naar de kust. Hierdoor verplaatst de NAP -5 m-lijn zich naar de kust. (fig. 7)

Het door de getijstroom losgemaakte zand wordt door de golven de delta ingevoerd. Met name in de vroegere geulen en achter de hooggelegen delen van de "Ooster" treedt aanzanding op, omdat de stroomsnelheden daar zijn afgenomen. Achter de hooggelegen delen van de "Ooster" is de golfwerking minder en kan het aangevoerde zand bezinken.

Dit proces zal doorgaan totdat een nieuw dynamisch evenwicht zal zijn ontstaan tussen de getijstroomingen langs de kust en de spuidebieten uit de afgedamde estuaria. Figuur 8 geeft de verwachte bodemligging van de delta van Zuid-West Nederland in de jaren 90 aan. Met name de ebstroom uit de half open Oosterschelde en de open Westerschelde zullen de huidige delta ter plaatse vermoedelijk in stand houden. De spuidebieten van de Grevelingen en het Haringvliet zijn echter zoveel kleiner geworden, dat daar een ander evenwicht zoals in figuur 8 is aangegeven, wordt verwacht.

Het Schaar voor de Kop van Goeree was voor de afdammingen een minder belangrijke stroomgeul in het deltagebied. Na de afdammingen is deze in betekenis toegenomen. Door de toegenomen stroomsnelheden neemt ook de diepte toe. (fig. 9, 10, 11 en 12)

In het noorden loopt het Schaar dood in een zogenaamde "vloedhaak". (fig. 5) De vloedhaak is ontstaan door de vergroeiing van een uitloper van de Ooster met het strand. In de vloedhaak zijn de stroomsnelheden gering, zodat het uit het Schaar aangevoerde zand daar kan bezinken. Als de vloedhaak te ondiep wordt, zoekt het Schaar een meer zeevaartse uitweg.

Westelijk van het Schaar ligt de bank de Ooster. Door de golven werd voor de afdammingen zand langs de Ooster in de richting van het Haringvliet getransporteerd. (2.1.) Door de toegenomen uitstroomsnelheden van het Schaar wordt dit oostwaartse golftransport naar het noorden afgebogen. Omdat naar het noorden toe de uitstroomsnelheden

afnemen en omdat de golfwerking, door de grotere diepte daar, kleiner is, bezinkt het zand. Zo drukt enerzijds de uitloper van het Schaar de Ooster naar het noorden en anderzijds drukt het golftransport die uitloper naar het oosten. (fig. 7)

Door de groei van de ondiepe delen van de Ooster is de golfaanval op de Kop van Goeree geringer geworden. Deze ondiepe delen doen als golfbreker dienst. De Kop van Goeree wordt nu meer bedreigd door de steeds verder gaande erosie van de geul het Schaar.

#### 2.4. Maatregelen die in het verleden zijn getroffen (lit. 2)

Voor de afdammingen van de estuaria in 1971 en 1972 ging de Kop van Goeree met ca. 7 m/jr achteruit. In 1965 besloot de directie van R.W.S. in Zuid-Holland tot het aanleggen van een duinregel met een kruinhoogte van NAP + 6,00 m. Deze moest voor voldoende veiligheid zorgen in de volgende 10 jaar.

Tussen 1965 en 1969 nam de achteruitgang van de Kop van Goeree echter toe tot ca. 20 m/jr en de laagwaterlijn kwam aan de voet van de duinregel te liggen. In '69-'70 en '71 werden zandsuppleties van achtereenvolgens 400.000 en 600.000 m<sup>3</sup> uitgevoerd met zand uit de Grevelingen. Deze moesten de kust een zodanige bescherming geven dat tot 1973 een storm met een overschrijdingsfrequentie van  $f = 10^{-3}/\text{jr}$  kon worden weerstaan. Daarna zou men in afwachting van de gevolgen van de afdammingen van de estuaria nieuwe maatregelen nemen.

In de winter '73-'74 werden een zandsuppletie en een duinverzwaring uitgevoerd, zodat bij een storm met een overschrijdingsfrequentie van  $f = 10^{-4}/\text{jr}$  geen bezwijken van de duinen zou optreden. Hiervoor werd 3 miljoen m<sup>3</sup> zand uit de Grevelingen gewonnen.

In de zomer van '77 volgde wederom een zandsuppletie. Nu werd er 1,2 miljoen m<sup>3</sup> zand gebruikt, dat vrijkwam bij de bouw van de doorlaatsluis in de Brouwersdam. De achteruitgang van de Kop van Goeree na deze zandsuppletie is aan het eind van de hierna opgesomde studies beschreven.



## 2.5. Studies die in het verleden zijn gedaan

In de afgelopen jaren zijn enkele studies gedaan naar de zandtransporten in het kustgebied van Goeree en langs een eventueel aan te leggen zanddam bij de Kop van Goeree, die het Schaar af zou sluiten. Door Van Overeem werden de dieptelijnen voor de kust geschematiseerd tot twee groepen van evenwijdige dieptelijnen. (lit. 3 en fig. 13) Met behulp van de CERC-formule en de golf- en windgegevens van het lichtschip Goeree berekende hij de zandtransporten door golven voor het geschematiseerde kustprofiel.

Voor zandtransporten ten gevolge van getij maakte hij gebruik van de stroomsnelheden zoals berekend met het computerprogramma B(rouwershavensche) G(at) 3 en de Bijkerformule. In het BG3-programma worden de stroomsnelheden ieder half uur in één getijcyclus voor een vak van 400 x 400 m<sup>2</sup> berekend.

Svasek schematiseerde de bodem voor de kust tot een aantal geknikte middendieptelijnen. (lit. 4 en fig. 14) De door hem aangepaste CERC-formule werd gebruikt en verwerkt in het computerprogramma TAP-RAM. Hij gebruikte eveneens de golf- en windgegevens van het lichtschip Goeree. Op deze studie wordt in hoofdstuk 4 teruggekomen.

Voor het getijtransport buiten de brekerzone maakten Bakker en Speekenbrink gebruik van Kirkham- Kalinske en voor het golftransport in de brekerzone van het rapport van Svasek. (lit. 5) Om de getijsnelheden te bepalen werden op 17 plaatsen bij de Kop van Goeree snelheidsmetingen gedaan. De metingen werden door Bakker en Speekenbrink betrouwbaarder geacht dan de berekeningen met het BG3-programma. Op deze studie wordt eveneens in hoofdstuk 4 teruggekomen.

In geen van de hierboven genoemde studies werden de berekende getijtransporten in het Schaar en de berekende golftransporten langs de Kop van Goeree betrouwbaar genoemd. Van een nieuwe poging om deze transporten te berekenen is afgezien, omdat dit een te groot deel van de studie - naar de inzetbaarheid van de punaise bij een zandsuppletie op de Kop van Goeree - in beslag zou nemen.

Bovendien werd niet verwacht dat een nieuwe berekening tot betere resultaten zou leiden. Overigens werden de berekende zandtransporten langs de Ooster en de noordkust van Goeree wel betrouwbaar genoemd.

In 1973 kwam een rapport uit van de werkgroep "Zanddam Kop van Goeree". (lit. 6) Dit rapport behandelde verschillende maatregelen om de erosie bij Goeree te verminderen of tot staan te brengen. De onderzochte maatregelen waren: zanddam met onbeschermd kop, zanddam met beschermd kop, strandhoofden, paalrijen en strand-suppleties. De zanddam, die de geul het Schaar moest afsluiten werd het meest effectief geacht.

Vanwege de grote hoeveelheid zand die hiervoor nodig is (ca.  $10 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ ), waardoor de investeringskosten flink oplopen, is van deze oplossing afgezien. Daarbij komt nog dat het onderhoud van de dam op  $0,35-0,70 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{jr}$  werd berekend tegen het onderhoud van het strand door suppletie op  $0,2-0,3 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{jr}$ .

Het meest recente rapport over Goeree komt van WWKZ in opdracht van de directie Zuid-Holland van R.W.S. (lit. 7) Aan de hand van lodingen in de jaren '77-'83 is de achteruitgang van de kuststrook van Goeree tussen de strandpalen 14.250 en 17.250 bepaald. (fig. 15) De zeewaartse en landwaartse grens worden gevormd door achtereenvolgens de NAP -5,00 m en +5,00 m-lijn van het zogenaamde maximum suppletieprofiel. (fig. 16) Daarbij is de kuststrook gesplitst in een deel boven G(emiddeld) L(aag) W(ater) en een deel beneden G.L.W. (ca. NAP -1,00 m).

De achteruitgang van de kuststrook in de periode '77-'82 bedroeg ca.  $85.000 \text{ m}^3/\text{jr}$ , terwijl in de periode juli '82-mei '83  $150.000 \text{ m}^3$  verloren ging. Tweederde van deze verliezen trad op in de strook boven G.L.W. en één derde beneden G.L.W. In het rapport wordt de verwachting uitgesproken dat in 1984 het zogenaamde "minimum-profiel", zoals de duinbeheerder dat hanteert, op meerdere plaatsen tussen de raaien 16.01 en 17.25 zal worden doorsneden. Indien dat gebeurt, zal binnen een jaar een zandsuppletie worden uitgevoerd. Inmiddels is om deze reden in het najaar van 1984 op de

Kop van Goeree 850.000 m<sup>3</sup> zand aangebracht.

## 2.6. Waarom een studie naar een zandsuppletie met de "punaise"?

Sinds de alternatieve maatregelen tegen de erosie van de Kop van Goeree zijn afgewogen, februari '73, (lit. 6) is er veel veranderd. De inflatie en de energiecrisis hebben het prijsbeeld drastisch gewijzigd. De techniek heeft niet stil gestaan. Door de economische recessie heeft de overheid minder mogelijkheden voor grote investeringen. Onder invloed van actiegroepen is men meer rekening gaan houden met het milieu op en in de zeebodem. In de Grevelingen mag daarom geen zand meer worden gewonnen. Tegen deze achtergrond moet het vervolg van dit rapport dan ook worden gezien.

De stand van de techniek maakt het mogelijk om in zowel ondiep als in diep water betrekkelijk kleine hoeveelheden zand te winnen en over een korte afstand met de zogenaamde "punaise" te verplaatsen. Door deze punaise in te zetten in de gebieden voor de Kop van Goeree waar aanzanding optreedt, is het niet langer nodig om zand te winnen uit de Grevelingen. Tevens wordt tegemoet gekomen aan de wensen om minder te investeren vanwege de geringere kosten, die aan deze techniek zijn verbonden.

Dit rapport zal zich dan ook beperken tot een zandsuppletie met behulp van de bovengenoemde punaise als alternatief voor zandwinning elders met conventionele werktuigen. Andere maatregelen ter vermindering van de erosie als strandhoofden en paalrijen werden al door Bakker onwenselijk geacht in verband met de onzekerheid in de resultaten bij een sterk gekromde kustlijn. (lit. 1) Daarbij verwachtte hij, dat het probleem van kustachteruitgang zich naar aangrenzende kustvakken zou verplaatsen.

De ingreep van de zanddam blijft eveneens buiten beschouwing gezien de hoge investerings- en onderhoudskosten, die met de uitvoering daarvan zijn gemoeid.

Door het uitvoeren van een suppletie zal de kustlijn niet noemens-

waardig veranderen. Het stromingsbeeld bij de Kop van Goeree zal dat dan evenmin doen. Daarom is het berekenen van het stromingsbeeld na de suppletie met behulp van een getijberekening niet nodig geacht.

### 3. VEILIGHEID VAN DE DUINENRIJ OP DE KOP VAN GOEREE

#### 3.1. Inleiding

##### 3.1.1. Algemeen

Voor de beoordeling van de veiligheid van de duinen op de Kop van Goeree als waterkering wordt gebruik gemaakt van de "leidraad". (lit. 8) In de leidraad is een nieuwe rekenmethode gegeven voor het berekenen van de veiligheid van de duinen als waterkering. Daartoe moet het afslagprofiel (= kustprofiel na stormvloed) worden berekend. De belangrijkste parameters voor deze afslag zijn: de stormvloedstand, de golfhoogte, het kustprofiel en de valsnelheid van het duinzand in zeewater. Dit zijn geen deterministische grootheden, maar stochastische variabelen.

Voor het bepalen van de afslag met een zekere kans van voorkomen zijn dus probabilistische berekeningen nodig. Door de vele mogelijke combinaties van parameters vergen deze uitputtende berekeningen te veel rekentijd. Daarom zijn in de leidraad beter hanteerbare rekenmethoden gegeven, die zijn gebaseerd op modelproeven en probabilistische berekeningen en toch tot aanvaardbare uitkomsten leiden.

##### 3.1.2. Achtergronden

Voor het bepalen van de vereiste sterkte van zeedijken en tot nog toe ook van duinen, wordt uitgegaan van ontwerppeilen zoals die zijn vastgesteld door de Deltacommissie. Daarbij wordt van een goede waterkering geëist, dat een geringe overschrijding van het ontwerppeil niet direct een doorbraak tot gevolg zal hebben. Dit betekent dus dat de overschrijdingsfrequentie van het ontwerppeil niet beschouwd kan worden als bezwijkfrequentie.

Voor een probabilistische ontwerpaanpak is het nodig dat vooraf een bezwijkkans wordt vastgesteld. Op grond van een onderzoek naar bestaande zeedijken die volgens het deterministische concept

zijn ontworpen, is door de T(echnische) A(dviescommissie) voor de W(aterkeringen) vastgesteld, dat de bezwijkkans een factor tien kleiner dient te zijn dan de overschrijdskans van het ontwerppeil.

### 3.1.3. Overzicht van de uitgevoerde berekeningen

Het bezwijken van een duin kan optreden door verschillende combinaties van factoren, allen met een eigen kans van voorkomen. In de leidraad is een rekenprocedure aangegeven die nagenoeg tot eenzelfde resultaat leidt als een groot aantal probabilistische berekeningen. In deze rekenprocedure is aangegeven welke rekenwaarden voor de verschillende parameters moeten worden ingevuld, om tot betrouwbare resultaten te komen voor de afslag, met een vooraf vastgestelde kans van voorkomen.

De eerste parameter die wordt bepaald, is de stormvloedstand. Omdat de waarde hiervan een rekenwaarde is, wordt deze R(eken) P(eil) genoemd. (3.2.)

De rekenwaarde voor de golfhoogte is de tweede parameter die wordt vastgesteld. Deze parameter is een functie van de stormvloedstand. Het verband staat voor diverse plaatsen aan de Nederlandse kust in figuur 17 weergegeven. Goeree is niet bij deze plaatsen opgenomen. In dit rapport wordt veiligheidshalve met de golfhoogte bij Hoek van Holland gerekend. (3.3.)

Reductie van de golfhoogte kan optreden door refractie en door het breken van de golven op de voor de kust gelegen bank de "Ooster". Volgens bijlage I zou de rekenwaarde van de golfhoogte op het strand bij raai 15.50 en 16.50 kunnen worden verlaagd door het optreden van refractie. Dat is in dit rapport niet gedaan, waardoor de berekende afslag iets groter is dan in werkelijkheid verwacht mag worden. Daarmee is de duinenrij iets veiliger dan uit de berekeningen volgt.

Om de duinenrij als waterkering te beoordelen moet de kering als een ketting met schakels worden gezien. Als één schakel faalt, dan faalt de ketting, al moet enige parallelwerking niet worden uitge-



sloten. In dit rapport zijn slechts twee schakels - de kustprofielen van raai 16.500 en 14.500 - beschouwd. Deze profielen vormen de derde parameter. (3.4.)

Volgens de Dienstkring Middelharnis was profiel 16.500 in 1983 het magerste profiel van de Kop van Goeree en dus de zwakste schakel van de ketting. Door de zandbank in dit profiel wordt de rekenwaarde voor de golfhoogte echter gereduceerd. In profiel 14.500 daarentegen is geen zandbank aanwezig en wordt de golfhoogte niet gereduceerd. De golfaanval is hier het grootst en profiel 14.500 is daarmee de meest bedreigde schakel van de ketting. (3.4.)

De reductie van de golfhoogte in raai 16.500 door breking op de zandbank is berekend met een model van Battjes en Janssen. Dit model beschrijft het verloop van de golfhoogte in een profiel met bank en geul voor een onregelmatig golfveld. (lit. 9) De golfopzet is in de berekeningen voor raai 16.500 niet meegenomen. Voorts is aangenomen, dat de rekenwaarde van de golfhoogte gelijk is aan de significante golfhoogte van een onregelmatig golfveld. (3.5.)

De vierde en laatste parameter is de rekenwaarde voor de valsnelheid van het zand in water. De korreldiameter van het duinzand is hiervoor bepalend. Daarom wordt eerst een rekenwaarde voor de korreldiameter bepaald en vervolgens de bijbehorende rekenwaarde voor de valsnelheid. (3.6.)

Het berekende afslagprofiel wordt nu zodanig in het opgemeten aanwezige kustprofiel geschoven, dat de aanzanding en afslag gelijk zijn. Door de variaties in stormduur, stormvloedpeil en onnauwkeurigheden in het rekenmodel wordt het afslagprofiel verder landwaarts verschoven. De positie van de duinvoet na stormvloed P kan dan worden afgelezen. De positie van het afslagpunt P is zo berekend voor de in de jaren '77-'83 jaarlijks opgemeten kustprofielen van raai 16.500.

Raai 14.500 is niet verder in beschouwing genomen, omdat de achteruitgang van de duinvoet te gering bleek.

Deze afslagpunten P zijn tegen de tijd uitgezet en door deze punten is een zogenaamde "afslaglijn" getrokken. In verband met profiel-

fluctuaties en langstransportverschillen tijdens stormvloed is deze afslaglijn verder landwaarts geschoven. De verschoven afslaglijn heet ontwerpafslaglijn. (3.7.)

Het in de leidraad gedefinieerde grensprofiel geeft aan hoe het kustprofiel er na een stormvloed uit mag zien, zodat nog juist geen doorbraak optreedt. Het grensprofiel is in paragraaf 3.8. gegeven.

Tenslotte wordt met de ontwerpafslaglijn voor raai 16.500 bepaald wanneer het grensprofiel zal zijn bereikt en dus niet meer aan de veiligheidseisen wordt voldaan. (3.9.)

### 3.2. Rekenpeil

De stormvloedstand waarmee gerekend wordt, wordt R(eken) P(eil) genoemd. In de leidraad wordt voor het RP de volgende formule gehanteerd.

$$RP = \text{ontwerppeil} + 2/3 \text{ decimeringshoogte} \quad (3.2.1)$$

Het ontwerppeil is gelijk genomen aan het deltapeil met een overschrijdingsfrequentie van  $10^{-4}$ /jr. De decimeringshoogte is het waterstandsverschil tussen het ontwerppeil en de waterstand met een tienmaal kleinere overschrijdingsfrequentie (= de bezwijkfrequentie van de waterkering). De onderstaande tabel geeft de gegevens voor Goeree, die zijn ontleend aan lit. 2.

overschrijdings- frequentie $f$ (1/jr)	w.s. (t.o.v. NAP)	decimeringshoogte (m)
$10^{-1}$	+3,00	
$10^{-2}$	+3,65	0,65
$10^{-3}$	+4,35	0,70
$10^{-4}$	+5,10	0,75

Tabel 3.2

(lit. 2)

Door extrapolatie vinden we bij  $f = 10^{-5}$ /jr een waterstand van NAP +5,90 m. Dat is 0,80 m meer dan bij  $f = 10^{-4}$ /jr. Bij een bezwijkfrequentie van  $10^{-5}$ /jr wordt het RP met (3.2.1) voor



Goeree dan:

$$\begin{aligned} RP &= \text{NAP} + 5,10 \text{ m} + 2/3 \times 0,80 \text{ m} \\ &\approx \text{NAP} + 5,60 \text{ m} \end{aligned} \quad (3.2.2)$$

### 3.3. Golfhoogte en -richting op diep water

#### 3.3.1. Golfhoogte

In figuur 17 is het verband tussen het stormvloedpeil en de significante golfhoogte op diep water gegeven voor onder andere Hoek van Holland en Vlissingen. Het verband voor Goeree is niet gegeven. Het RP bij Hoek van Holland is NAP + 5,50 m en bij Vlissingen NAP + 5,90 m. (bezwijkfrequentie  $10^{-5}$ /jr)

De bijbehorende significante golfhoogten zijn achtereenvolgens 8,20 m en 7,30 m. Omdat Goeree tussen Hoek van Holland en Vlissingen ligt zou de golfhoogte daar met lineaire interpolatie kunnen worden bepaald. Bij het RP van Goeree van NAP + 5,60 m hoort dan een significante golfhoogte van ca. 8,00 m.

In dit rapport wordt echter met de golfhoogte van Hoek van Holland van 8,20 m gerekend. Hiermee zitten we aan de veilige kant bij de berekening van de duinafslag.

#### 3.3.2. Golfrichting

Reductie van de golfhoogte kan optreden door breking van de golven. De breking is afhankelijk van de waterdiepte onder de golven. Voor een bepaald punt op het strand is de golfhoogte afhankelijk van de diepte van de bodem waarover de golven het punt bereiken en daarmee van de richting waaruit de golven aanlopen.

Met behulp van figuur 18 kan bij bekende golfhoogte en -periode worden afgelezen welke strijkengte daarbij hoort. Uit paragraaf 3.3.1. is bekend, dat de golfhoogte 8,2 m is. Volgens de leidraad (lit. 8) mag voor de periode van de piek van het golfspectrum

$T = 12$  s worden gerekend. Uit figuur 18 blijkt, dat voor deze combinatie van golfhoogte en -periode een strijklengte van tenminste 1000 km nodig is.

Door een cirkel met een straal van 1000 km met Goeree als middelpunt uit te zetten, vinden we de mogelijke richtingen waaruit dergelijke golven Goeree kunnen bereiken. Uit figuur 19 blijkt, dat dit voor Goeree de sector tussen NNW en N is. Bij de berekening is dan ook uitgegaan van een golfaanval vanuit het noorden.

### 3.4. Keuze van de raai

Vanuit vier punten op de Kop van Goeree zijn dwarsprofielen getekend in noordelijke richting. (fig. 2 en 20) De profielen zijn gemaakt met behulp van de lodingkaart kustgebied Goeree 3 juni-6 oktober 1982.

Het eerste profiel van raai 16.500 is in beschouwing genomen vanwege het magere duinprofiel aldaar. Evenals in de raaien 15.500 en 15.010 passeren de golven eerst een zandbank en een geul om bij de duinen te komen. (fig. 2) De zandbank reduceert de hoogte van de golven die de duinen zullen aanvallen.

Reductie van de golfhoogte kan niet optreden in raai 14.500, omdat hier geen zandbank voor de kust ligt. De duinen in raai 14.500 worden dan ook het zwaarst aangevallen. Daarom is raai 14.500 eveneens in beschouwing genomen.

### 3.5. Bepaling van de rekenwaarde van de golfhoogte voor duinafslag

#### 3.5.1. Berekening van de reductie van de golfhoogte ten gevolge van de zandbank

Battjes en Janssen hebben een 1-dimensionaal model ontwikkeld voor de berekening van de dissipatie van golfenergie door breking in een onregelmatig golfveld. (lit. 9) De differentiaalvergelijking hiervoor luidt:

$$\frac{\delta P}{\delta x} + D = 0 \quad (3.5.1)$$

$$P = c_g E = c_g \frac{1}{8} \rho g H_{rms}^2 \quad (3.5.2)$$

Hierin is:

- P = energietransport (W/m)
- $c_g$  = groepsnelheid van de golven (m/s)
- $\rho$  = dichtheid van zeewater (1030 kg/m<sup>3</sup>)
- g = versnelling van de zwaartekracht (9,81 m/s<sup>2</sup>)
- $H_{rms}$  = root mean square golfhoogte van het onregelmatig golfveld (m)
- D = energiedissipatie (W/m<sup>2</sup>)

De x-as is horizontaal en valt samen met de golfrichting.

De dissipatie van de golfenergie ten gevolge van breking wordt bepaald naar analogie van de dissipatie van een brekende "bore" volgens Le Méhauté. (lit. 10)

Battjes en Janssen veronderstellen dat er een fysische grens is aan de golfhoogte. Deze grens wordt bepaald door de diepte h, een constante  $\gamma$  en de golflengte L volgens de vergelijking:

$$H_m = 0,88 k^{-1} \tanh \frac{\gamma kh}{0,88} \quad (3.5.3)$$

$H_m$  = fysisch maximale golfhoogte (m)

$$\gamma = 0,5 + 0,4 \tanh \frac{35 H_{rms,0}}{L_0} \quad (3.5.4)$$

$$k = \frac{2\pi}{L} \quad (3.5.5)$$

$H_{rms,0}$  =  $H_{rms}$  in diep water (m)

$L_0$  = golflengte in diep water (m)

Bij het passeren van een dieptelijn zullen alle golven hoger dan de daarbij horende  $H_m$  breken. Na breking zullen deze golven de hoogte  $H_m$  hebben. De kans, dat een golf in een golfveld hoger is dan  $H_m$  wordt  $Q_b$  genoemd. Battjes en Janssen namen een Rayleigh-verdeling voor de golfhoogte in een golfveld zonder breken aan. Het verband tussen  $H_m$ ,  $H_{rms}$  en  $Q_b$  luidt dan:

$$\frac{1 - Q_b}{\ln Q_b} = - \left( \frac{H_{rms}}{H_m} \right)^2 \quad (3.5.6)$$

De dissipatie D wordt gegeven door:

$$D = \frac{\alpha}{4} f_p Q_b \rho g H_m^2 \quad (3.5.7)$$

Hierin is:

$\alpha$  = constante van de orde 1

$f_p$  = piekfrekwentie van het spectrum (1/s)

Voor het oplossen van de differentiaalvergelijking (3.5.1) is een numerieke methode gehanteerd. (bijlage II) Het verloop van de golfhoogte is raai 16.500 is in figuur 21 weergegeven bij golfaanval vanuit het noorden.

Het model houdt geen rekening met de toevoer van energie door wind, met name na het passeren van de zandbank. Hierdoor is de berekende golfhoogte achter de zandbank wellicht iets te laag.

### 3.5.2. Golfopzet

Behalve voor de berekening van de dissipatie van golfenergie ten gevolge van breken, deden Battjes en Janssen ook een suggestie voor de berekening van de golfopzet. De differentiaalvergelijking hiervoor luidt:

$$\frac{dS_{xx}}{dx} + \rho g h \frac{d\bar{\eta}}{dx} = 0 \quad (3.5.8)$$

na vermenigvuldiging met dx :

$$dS_{xx} + \rho g h d\bar{\eta} = 0 \quad (3.5.9)$$

$$S_{xx} = \left( \frac{1}{2} + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right) \frac{1}{8} \rho g H_{rms}^2 \quad (3.5.10)$$

$$h = d + \bar{\eta} \quad (3.5.11)$$

Hierin is:

d = stil waterniveau (m)

$\bar{\eta}$  = golfopzet (m)

Voor het oplossen van de differentiaalvergelijking (3.5.8) is een numerieke methode gehanteerd. (bijlage III) Daarmee werd in raai 16.500 een golfopzet van 0,31 m berekend. Uit een vergelijking met

de resultaten van een computerberekening van het W.L. in een soortgelijke situatie bleek deze 0,13 m te hoog te zijn. Omdat bij de berekening van het Reken Peil volgens de leidraad geen rekening wordt gehouden met de golfopzet, is dat in dit repport evenmin gedaan.

### 3.5.3. Rekenwaarde voor de golfhoogte

De golfhoogte zoals berekend met Battjes/Janssen moet in overeenstemming worden gebracht met de leidraad, waarin wordt uitgegaan van de golfhoogte op diep water. Hiertoe moet de situatie met bank en geul worden vertaald naar een situatie zonder bank en geul, voor de in te vullen waarde van  $H_{S,0}$ . (fig. 22)

Verondersteld wordt, dat de energie ter plaatse van de grootste diepte in de geul vanaf diep water in aangevoerd. Bij een regelmatig oplopende bodem blijkt er vrijwel geen energie verloren te gaan bij het voortplanten van de golven zolang:

$$h > 4 H_{rms} \quad (3.5.12)$$

Uit berekeningen in bijlage II van het verloop van  $H_{rms}$  in raai 16.500 blijkt, dat voor  $h = 11,5$  m (het diepste punt van de geul (fig. 20))  $H_{rms} = 2,1$  m, waarmee aan (3.5.12) is voldaan. Ook in dit punt kan het energietransport met vergelijking (3.5.2) worden berekend.

Zou de golfenergie, zoals eerder is verondersteld, zijn aangevoerd vanaf diep water, dan zou het energietransport in de geul gelijk moeten zijn aan het energietransport op diep water:

$$c_g \frac{1}{8} \rho g H_{rms,gl}^2 = c_{g,0} \frac{1}{8} \rho g H_{rms,0}^2 \quad (3.5.13)$$

ofwel:

$$H_{rms,0} = \sqrt{\frac{c_g}{c_{g,0}}} H_{rms,gl} \quad (3.5.14)$$

Hierin is:

- 0 = index voor diep water
- gl = index voor geul

De gezochte  $H_{S,0}$  is  $\sqrt{2}$  maal zo groot als  $H_{rms,0}$ . Dit geeft met (3.5.14):

$$H_{S,0} = \sqrt{\frac{2 c_g}{c_{g,0}}} H_{rms,gl} \quad (\text{fig. 22}) \quad (3.5.15)$$

Uit de berekeningen (bijlage II) volgt, dat als  $h = 11,5$  m, dan  $c_g = 9,1$  m/s, en als  $h = \infty$ , dan  $c_{g,0} = 9,4$  m/s. Dit ingevuld in (3.5.15) geeft  $H_{S,0} = 2,9$  m in raai 16.500.

Voor profiel 14.500 is bovenstaande berekening niet uitgevoerd, omdat de bodem hier continu oploopt. Er komt geen bank met geul in het profiel voor en er wordt evenmin voldaan aan de voorwaarde (3.5.12). In profiel 14.500 moet dan ook met  $H_{S,0} = 8,2$  m worden gerekend.

### 3.6. Rekenwaarde voor de valsnelheid van duinzand in zeewater

De korreldiameter van het zand bepaalt de valsnelheid van dat zand in zeewater. Met de vorm van de korrel wordt geen rekening gehouden. Het boven het RP afgeslagen zand wordt door de golven van de kust afgevoerd en bezinkt op een zekere afstand uit die kust. Indien de valsnelheid van het zand groot is, dan zal het afgeslagen zand de bodem snel bereiken en dus niet ver van de kust worden afgevoerd. Het afslagprofiel is dan kort.

De valsnelheid van zandkorrels in zeewater met een temperatuur van 5°C wordt berekend met de empirische formule:

$$10 \log \frac{1}{w} = 0,476 \left( 10 \log D \right)^2 + 2,180 \cdot 10 \log D + 3,226 \quad (3.6.1)$$

Hierin is:

$w$  = valsnelheid in zeewater (m/s)

$D$  = korreldiameter (m)

Nu is de korreldiameter van het zand niet uniform. De leidraad geeft voor de in te vullen waarde van de korreldiameter:

$$D_{reken} = \mu_{D50} - 5 \cdot \frac{\sigma_{D50}^2}{\mu_{D50}} \quad (3.6.2)$$

Hierin is:

$\mu_{D50}$  = de verwachtingswaarde van de  $D_{50}$  (m)

$\sigma_{D50}$  = de standaard afwijking van de  $D_{50}$  (m)

$D_{50}$  = diameter van de zeef waarbij 50% van een zandmonster wordt doorgelaten

In de leidraad zijn de waarden van  $\mu_{D50}$  en  $\sigma_{D50}$  voor de raaien 15.01 en 17.01 gegeven. Deze waarden en de vergelijkingen (3.6.2) en (3.6.1) leiden tot de onderstaande tabel:

raainr.	$\mu_{D50}$ ( $\mu\text{m}$ )	$\sigma_{D50}$ ( $\mu\text{m}$ )	$D_{\text{reken}}$ ( $\mu\text{m}$ )	w (m/s)
15.01	267	37	240	0,0261
17.01	242	19	235	0,0261

Tabel 3.6

Omdat geen gegevens voor de in beschouwing genomen raaien 14.500 en 16.500 beschikbaar zijn, is voor de berekening verondersteld, dat de valsnelheid daar gelijk is aan die in de raaien 15.01 en 17.01.

### 3.7. Achteruitgang van de duinen

#### 3.7.1. Het afslagprofiel

Nu de vier parameters  $H_{s,0}$ , w, het kustprofiel en het RP bekend zijn, kan het afslagprofiel worden berekend met:

$$\left(\frac{7,6}{H_{s,0}}\right) y = 0,4714 \left[ \left(\frac{7,6}{H_{s,0}}\right)^{1,28} \cdot \left(\frac{w}{0,0268}\right)^{0,56} \cdot x + 18 \right]^{0,5} - 2,00 \quad (3.7.1)$$

(fig. 23)

Waarin x en y in m,  $(x, y) = (0, 0)$  de duinvoet voorstelt en  $y = 0$  samenvalt met het RP. De x-as staat horizontaal en loodrecht op de kustlijn en is zeewaarts van de duinvoet positief.

$$\begin{aligned} \text{Zeewaarts van het punt } x &= 250 \left(\frac{H_{s,0}}{7,6}\right)^{1,28} \cdot \left(\frac{0,0268}{w}\right)^{0,56} \\ y &= 5,717 \cdot \frac{H_{s,0}}{7,6} \end{aligned}$$

gaat het profiel over in een helling van 1 : 12,5. Landwaarts van het punt  $(0, 0)$  is het duintalud 1 : 1. Dit afslagprofiel wordt in het aanwezige duinprofiel geschoven, zodat de afslag gelijk is aan de



aanzanding. (fig. 23)

In profiel 14.500 met  $H_{s,0} = 8,2$  m is de achteruitgang van de duinvoet gering, omdat het afslagprofiel hier vrijwel samenvalt met het aanwezige duinprofiel. (fig. 24) Voor profiel 16.500 geldt dit ondanks de lagere golfhoogte,  $H_{s,0} = 2,9$  m, niet. (fig. 25) Daarom is in dit rapport alleen profiel 16.50 nader bestudeerd.

### 3.7.2. Duinvoet na stormvloed

De positie van de duinvoet na de stormvloed (punt P) is niet exact bekend. (fig. 23) De oorzaken hiervoor zijn:

- variaties in het kustprofiel
- variaties in de stormduur
- variaties in het stormvloedpeil door bui-oscillaties
- onnauwkeurigheden in het rekenmodel

Op de eerstgenoemde oorzaak wordt in paragraaf 3.7.4. teruggekomen. Voor de drie laatstgenoemde oorzaken tezamen wordt volgens de leidraad een toeslag berekend voor de duinafslag boven het RP van:

$$\sigma = 0,25 A + 20 \text{ m}^3/\text{m} \quad (3.7.2)$$

Hierin is:

$$\begin{aligned} \sigma &= \text{toeslag boven het RP (m}^3/\text{m)} \\ A &= \text{berekende duinafslag (m}^3/\text{m)} \end{aligned}$$

Het punt P wordt zodanig landwaarts verschoven, dat de toeslag juist in het aanwezige profiel past. (fig. 26)

### 3.7.3. Afslaglijn volgens waarnemingen

In de jaren '77 tot en met '83 is het duinprofiel in raai 16.50 jaarlijks opgemeten. In ieder profiel is de positie van punt P bepaald. (bijlage IV) De positie van punt P ten opzichte van de hoofdstrandpalenlijn (fig. 2) is tegen de tijd uitgezet in figuur 27. Door deze punten is een beste rechte getrokken. Daarbij wordt verondersteld,



dat de achteruitgang van het punt P lineair met de tijd verloopt. De gevonden beste rechte wordt de afslaglijn genoemd. Uit bijlage V volgt voor deze lijn:

$$P = 3,75 t + 136 \quad (3.7.3)$$

Hierin is:

P = positie van het afslagpunt P t.o.v. de hoofdstrandpalenlijn (m)

t = tijd in jaren na 1900

De afslaglijn is gebaseerd op slechts zeven punten. De leidraad geeft aan, dat men pas tot betrouwbare uitkomsten kan komen, indien men de beschikking heeft over de gegevens van 15 achtereenvolgende jaren. Nu zijn de gegevens van de jaren '69-'77 weliswaar beschikbaar, doch daarvan is geen gebruik gemaakt vanwege het grote aantal ingrepen dat in die periode heeft plaatsgevonden. Het Haringvliet en het Brouwershavensche Gat werden gesloten en op de Kop van Goeree werden niet minder dan vier zandsuppleties uitgevoerd.

#### 3.7.4. De correctie op de afslaglijn voor profielfluctuaties

Door de invloed van getij, golven en wind is het kustprofiel aan verandering onderhevig. Met het kustprofiel verandert ook de positie van het afslagpunt P. Dit wordt in rekening gebracht door de afslaglijn landwaarts te verschuiven over een afstand:

$$d = \frac{\sigma_p^2 z}{275} \quad (3.7.4)$$

Hierin is:

d = landwaartse verschuiving van de afslaglijn (m)

$\sigma_p$  = standaardafwijking van de ligging van de punten P ten opzichte van de afslaglijn (m)

z = gemiddelde waarde van de hoogteverschillen tussen het meest landwaartse en zeewaartse punt van het afslagprofiel in de achtereenvolgende jaren (m)  
(fig. 26)

Uit bijlage V volgt:  $d \approx 3 \text{ m}$  (3.7.5)

### 3.7.5. Extra verschuiving van de afslaglijn ten gevolge van langtransportverschillen tijdens stormvloed

Door de sterke kromming van de kustlijn ( $15-30^{\circ}/\text{km}$ ) is het langtransport niet constant. Door langtransportverschillen tijdens de stormvloed kan extra erosie optreden. Hierdoor zal het afslagpunt P een extra achteruitgang vertonen tenopzichte van de situatie zonder langtransportverschillen. De leidraad geeft voor het in rekening te brengen langtransportverschil:

$$G = \frac{A^{\circ}}{300} \left( \frac{H_{S,0}}{7,6} \right)^{0,72} \cdot \left( \frac{w}{0,0268} \right)^{0,56} \cdot G_0 \quad (3.7.6)$$

Hierin is:

$G$  = rekenwaarde voor het verschil in langtransport tijdens stormvloed ( $\text{m}^3/\text{m}$ )

$G_0$  = referentiewaarde voor  $G$ , afhankelijk van de kromming van de kust ( $\text{m}^3/\text{m}$ )

$$A' = A + \sigma \quad (3.7.7)$$

$A'$  = duinafslag boven het RP inclusief toeslag ( $\text{m}^3/\text{m}$ )  
(fig. 26)

De leidraad geeft voor een kromming van  $18-24^{\circ}/\text{km}$  voor  $G_0$  een waarde van  $100 \text{ m}^3/\text{m}$ . Voor sterkere krommingen, zoals bij Goeree, is nader onderzoek gewenst.

In bijlage VI is een eerste poging gedaan  $G$  te berekenen voor Goeree met behulp van de CERC-formule. Daarbij wordt opgemerkt, dat de CERC-formule is opgesteld voor rechte kustlijnen. Het berekende verschil in langtransport bedroeg slechts  $2,3 \text{ m}^3/\text{m}$ , vanwege de lage golfhoogte die bij de kust verwacht mag worden. De golven zullen immers breken op de zandbank voor de kust en daar reeds een groot deel van hun energie verliezen.

Een andere manier om  $G$  te bepalen, is extrapolatie van de gegevens uit de leidraad. De referentiewaarde  $G_0$  bij raai 16.50 (kromming  $27^{\circ}/\text{km}$ ) is dan  $125 \text{ m}^3/\text{m}$ . Voor  $A'$  is de gemiddelde waarde van de jaren '77 tot en met '83 genomen. Uit de berekeningen in bijlage IV volgt:

$$A' = \frac{\sum A + \sigma}{n} = 52 \text{ m}^3/\text{m} \quad (3.7.8)$$

Invullen van de gegevens in (3.7.6) levert:

$$G = \frac{52}{300} \cdot \left(\frac{2,9}{7,6}\right)^{0,72} \cdot \left(\frac{0,0261}{0,0268}\right)^{0,56} \cdot 125$$

$$\approx 11 \text{ m}^3/\text{m} \quad (3.7.9)$$

Deze waarde komt niet overeen met de waarde, berekend met behulp van de CERC-formule. Uit de CERC-formule volgde zelfs een aanzanding. Dit komt doordat er bij het gebruik van de CERC-formule verondersteld is, dat golven uit het noorden komen. Raai 16.50 ligt dan juist in de luwte van de golfaanval, zodat daar aanzanding zal optreden. Nader onderzoek naar de langstransporten tijdens stormvloed is dan ook gewenst.

Om aan de veilige kant te blijven wordt hier verder gerekend met de via extrapolatie verkregen waarde voor  $G$  van  $11 \text{ m}^3/\text{m}$ . De extra achteruitgang van het punt P wordt volgens de leidraad gegeven door:

$$g = \frac{G}{\bar{z}} \quad (3.7.10)$$

(fig. 26)

Met  $\bar{z} = 4 \text{ m}$  (bijlage V) en  $G = 11 \text{ m}^3/\text{m}$  volgt:

$$g \approx 3 \text{ m} \quad (3.7.11)$$

### 3.7.6 Ontwerpafslaglijn

De ontwerpafslaglijn wordt verkregen door het in rekening brengen van de verschillen in langstransport tijdens stormvloed en de profielfluctuaties. De afslaglijn (3.7.3) wordt daartoe over een afstand  $d + g$  landwaarts verschoven. Met  $d \approx 3 \text{ m}$  en  $g \approx 3 \text{ m}$  wordt de ontwerpafslaglijn:

$$P = 3,75 t + 142 \quad (3.7.12)$$

(fig. 27)

### 3.8. Grensprofiel (raai 16.500)

De leidraad geeft een definitie voor het grensprofiel, waarbij nog juist geen doorbraak op zou treden. Het profiel heeft een minimale kruinhoogte  $h_0$  :

$$h_0 = RP + 0,12 T \cdot \sqrt{H_{S,0}} \quad (3.7.13)$$

Met  $RP = NAP + 5,60$  m,  $T = 12$  s en  $H_{S,0} = 2,9$  m volgt:

$$h_0 = NAP + 8,10 \text{ m} \quad (3.7.14)$$

De kruinbreedte van het grensprofiel is minimaal 3 m, het binnentalud heeft een helling van 1 : 2 en het buitentalud heeft een helling van 1 : 1. (fig. 29)

### 3.9. Veiligheid van de duinen

Nu de ontwerpafslaglijn en het grensprofiel bekend zijn, kan worden bepaald wanneer het grensprofiel zal worden bereikt. Uit figuur 27 blijkt, dat dit na het jaar 2000 zal zijn.

Richt men zich op het grensprofiel van de leidraad, dan luidt de conclusie, dat de duinen op de Kop van Goeree een veilige waterkering vormen. Een zandsuppletie uit veiligheidsoverwegingen is op grond van de leidraad dan ook niet noodzakelijk.

De duinbeheerder, de Dienstkring Middelharnis van R.W.S., hanteert het "minimumsuppletieprofiel" als criterium voor een eventuele strandsuppletie. (fig. 29) Indien dit profiel wordt doorsneden, dan wordt binnen een jaar een zandsuppletie uitgevoerd. Omdat verwacht werd, dat het "minimumprofiel" in '84 op meerdere plaatsen zou worden doorsneden. (lit. 7), is besloten tot een zandsuppletie. (lit. 11)

Deze zandsuppletie zal in het najaar van '84 worden uitgevoerd tussen de strandpalen 14.50 en 17.50.\* Daar moet  $850.000 \text{ m}^3$  zand, iets meer dan het verlies sinds '77, op het strand worden gebracht. Deze gegevens vormen de uitgangspunten voor het vervolg van dit rapport: Het onderzoek naar de inzetbaarheid van de punaise bij de uitvoering van deze zandsuppletie.

\*) Inmiddels is dit werk uitgevoerd.

## 4. OPSPORING WINGEBIEDEN

### 4.1. Inleiding

In paragraaf 3.9. werd vermeld, dat er 850.000 m<sup>3</sup> zand op het strand van de Kop van Goeree moet worden gesuppleerd. In dit hoofdstuk wordt beschreven hoe geschikte wingebieden - waar het eerder genoemde werktuig, de punaise, kan worden ingezet - zijn opgespoord.

Het in te zetten werktuig wordt concurrerend met conventionele werktuigen geacht, indien de afstand tussen het wingebied en het stort kleiner is dan 10 km. Daarom is gezocht naar wingebieden binnen een straal van 10 km van de Kop van Goeree, het stort, maar ook niet zo dichtbij de kust, dat er gevaar voor ondergraving van het strand en duinen ontstaat.

Een tweede criterium voor het al dan niet geschikt zijn van een wingebied is, dat er duidelijk aanzanding optreedt in het wingebied. Om deze gebieden te vinden zijn twee wegen bewandeld.

Eerst is aan de hand van de resultaten van de transportberekeningen van Svasek (lit. 4) en van Bakker en Speekenbrink (lit. 5) vastgesteld waar aanzanding optreedt. Daarna is hetzelfde gedaan, doch nu met behulp van kuberingen. In paragraaf 4.4. worden de resultaten van deze methoden vergeleken.

In de laatste paragraaf 4.5. wordt een wingebied besproken waar geen aanzanding optreedt. Wanneer daar echter zand gewonnen zal worden, dan zou de erosie van de kust kunnen verminderen.

### 4.2. Transportberekeningen

Svasek berekende het zandtransport door golven in de brekerzone met de door hem aangepaste CERC-formule. Hij gebruikte daarvoor de lodingen van het kustgebied van Goeree van '74 en het golfklimaat van '51-'60. De energieverdeling van de golven van '51-'60 lag 5-10% lager dan in de periode '74-'76.

De berekende zandtransporten zijn getoetst aan de gemeten bodemveranderingen in de periode '74-'76. Uit de figuren 30 en 31 blijkt, dat de berekeningen voor de noordkust (A-B) goed overeenkomen met de metingen.

De sprong in het transport bij B wordt veroorzaakt door de geul "het Schaar". Met de invloed hiervan is geen rekening gehouden. Het verloop van de transporten langs EF is onzeker, omdat het dwarstransport over de kruin van de banken, die op NAP - 3,00 m ligt, groot kan zijn. Met deze dwarstransporten, die zowel door golven als door getijstromen veroorzaakt kunnen worden, is evenmin rekening gehouden.

De resultaten van de door Svasek berekende golftransporten staan in figuur 32. Voor de kust ten zuiden van strandpaal 16.01 is de berekening niet betrouwbaar. De berekeningen wijzen namelijk op een geringe aanzanding. De werkelijkheid is dat dit kustgedeelte de laatste jaren sterk achteruit is gegaan. De oorzaken hiervoor kunnen zijn: de eroderende werking van de getijstromen in de geul "het Schaar" en de invloed van achter de bank "de Ooster" opgewekte windgolven. Met geen van deze invloeden is in de berekeningen rekening gehouden.

Bakker en Speekenbrink berekenden het zandtransport buiten de brekerzone door getijstromen met de formule van Kirkham-Kalinske. Zij maakten gebruik van snelheidsmetingen die in '72 op zeventien verschillende plaatsen in het kustgebied van Goeree waren gedaan tijdens een als representatief verondersteld getij.

Een toetsing van berekende getijtransporten aan gemeten transporten is niet gedaan. De werkelijke transporten werden evenwel geschat op een derde van de berekende transporten. De berekende transporten zonder deze correctie staan gegeven in figuur 33.

Indien wordt aangenomen, dat de zandtransporten door golven en door stroming kunnen worden gesuperponeerd, dan kunnen gebieden met aanzanding worden gevonden. Aanzanding of erosie treedt op als er transportverschillen optreden. In figuur 34 zijn de golf- en gecorrigeerde getijtransporten met de erosie- en aanzandings-



gebieden gegeven. Zandtransporten kleiner dan  $30.000 \text{ m}^3/\text{jr}$  zijn daarbij verwaarloosd.

De aanname dat de zandtransporten door golven en getij kunnen worden gesuperponeerd is echter niet juist. Met name in ondiepe gebieden kan het zandtransport door de getijstroom worden verhoogd door de golforbitaalbeweging. Deze beweging zorgt, dat er zand wordt losgewoeld, dat door de stroom wordt afgevoerd.

De formule van Bijker kan dit probleem ondervangen. Deze formule heeft echter als nadeel dat er veel variabelen moeten worden ingevoerd, die allen een statistische verdeling hebben. Dit leidt tot een omvangrijk rekenwerk. De verwachtingen omtrent de nauwkeurigheid van de uitkomsten zijn niet hoog. Een dergelijke berekening is dan ook achterwege gelaten.

Uit figuur 34 blijkt, dat de aanzanding in de verschillende gebieden varieert van  $40.000$  tot  $300.000 \text{ m}^3/\text{jr}$ . Sinds de zandsuppletie in '77 is jaarlijks ca.  $85.000 \text{ m}^3$  zand verloren gegaan op de Kop van Goeree. Wordt er uit de gebieden met een jaarlijkse aanzanding van  $100.000 \text{ m}^3$  of meer zand gewonnen met een gemiddelde hoeveelheid van  $85.000 \text{ m}^3/\text{jr}$ , dan kan worden verwacht dat dit de huidige zandtransporten in het kustgebied van Goeree nauwelijks zal verstoren. De gebieden met een jaarlijkse aanzanding van  $100.000 \text{ m}^3$  of meer komen daarom in aanmerking als wingebied. Volgens figuur 34 zijn er dan vier mogelijkheden. Twee gebieden ten westen van de vuurtoren met berekende aanzandingen van  $100.000$  en  $300.000 \text{ m}^3/\text{jr}$  en twee gebieden tussen raai 14.01 en het Flaauwe Werk met aanzandingen van eveneens  $100.000$  en  $300.000 \text{ m}^3/\text{jr}$ .

#### 4.3. Kuberingen

De opsporing van wingebieden is ook met kuberingen uitgevoerd. Daarbij is gebruik gemaakt van de verschilkaarten '70-'75 en lodingen van '70, '75 en '80 van het kustgebied van Goeree.



Over het kustgebied van Goeree (inclusief de zandbank "de Ooster") is een vierkantennet gelegd. Voor ieder vierkant van  $200/200 \text{ m}^2$  is de gemiddelde diepte geschat uit de lodingen van '70, '75 en '80. Uit de verschillen in gemiddelde diepte per vierkant voor de jaren '70, '75 en '80 is de aanzanding of erosie berekend.

Deze methode is net zo min nauwkeurig als de methode van transportberekeningen. Dit vanwege de meetnauwkeurigheid van de lodingen van ca. 0,2 m en de wijze waarop de gemiddelde diepte in een vak van  $200 \times 200 \text{ m}^2$  wordt geschat. Deze schatting is gebaseerd op een interpretatie van de lodingen die toevallig binnen het vierkant vallen.

Desondanks werden enkele opvallende zaken geconstateerd. In vier afzonderlijke gebieden A, B, C en D werd een bodemverhoging van 0,15 m/jr of meer gevonden. (fig. 35) Deze verhoging kwam overeen met een aanzanding van 100.000 tot 200.000  $\text{m}^3/\text{jr}$  per gebied. Om te zien of dit slechts plaatselijke verschijnselen waren, werd een strook van 200 m breedte langs de omtrek van deze gebieden eveneens gekubeerd.

Met name de gebieden A en B bleken stabiele aanzandingsgebieden. Met de strook erbij is de aanzanding in A 300.000  $\text{m}^3/\text{jr}$  in plaats van 100.000  $\text{m}^3/\text{jr}$  en de gemiddelde bodemverhoging was 0,14 in plaats van 0,15 m/jr. Voor wingebed B waren dit achtereenvolgens 300.000  $\text{m}^3/\text{jr}$  in plaats van 200.000  $\text{m}^3/\text{jr}$  en 0,11 m/jr in plaats van 0,15 m/jr.

De aanzanding in de gebieden C en D bleek slechts plaatselijk op te treden. Met de strook erbij nam de jaarlijkse aanzanding nauwelijks toe, terwijl de gemiddelde bodemverhoging in C daalde van 0,17 naar 0,08 m/jr en in D van 0,16 naar 0,10 m/jr.

De aanzanding van de gebieden B en C vond plaats achter de hoge rug van de reeds bestaande banken. (fig. 36) De golven namen het zand aan de zeezijde op en transporteerden het evenwijdig aan de banken naar het oosten of er overheen. (Hoofdstuk 2) Het zand dat over de banken heen werd getransporteerd, bezonk achter de hoge rug van de bank waar de golven lager zijn.

Het zand dat langs de banken naar het oosten werd getransporteerd, kwam in de geulen die de "Ooster" doorsneden terecht. (Zie gebied D) Deze geulen, waar de golfinvloed beperkt was, vulden langzaam op. Voor de aanzanding in gebied A is vooralsnog geen verklaring te geven, maar vermoedelijk wordt dit ook veroorzaakt door landwaarts gericht dwarstransport door de golven na het wegvallen van de sterke dwars op de kust staande getijstromen.

In tien jaar na de afdammingen van het Brouwershavensche Gat (in 1972) en het Haringvliet (in 1971) is de zandvoorraad in de wingebieden A, B, C en D tezamen toegenomen met vijf tot acht miljoen kubieke meter. Daarbij is de lengte van het gebied boven NAP -2,50 m op de "Ooster" toegenomen van drie tot zes kilometer. (fig. 37)

#### 4.4. Vergelijking berekeningen en kuberingen

De aanzandingsgebieden, enerzijds gevonden met berekeningen en anderzijds met kuberingen, blijken slechts gedeeltelijk samen te vallen. (fig. 38)

Bij de berekeningen werd aangenomen, dat getij-en golftransport konden worden opgeteld. In paragraaf 4.2. werd deze aanname vooral voor ondiepe gebieden twijfelachtig genoemd. Daarnaast hadden de opgetelde transporten betrekking op twee verschillende bodemliggingen. Het getijtransport werd berekend bij de bodemligging van '72 en het golftransport bij die van '74. Het getijtransport werd voor één getijcyclus berekend en daarna vermenigvuldigd met het aantal getijden per jaar om het jaartransport te berekenen. Het golftransport had betrekking op een periode van twee jaar en werd dientengevolge door twee gedeeld om het jaartransport te verkrijgen.

De kuberingen hadden betrekking op een periode van tien jaar. ('70-'80) Daarbij zijn de verschillen in bodemhoogte om de vijf jaar beziën. Bovendien bleek de aanzanding in de gevonden gebieden bij vergelijking van de lodingkaarten van '80 en '83 in hetzelfde tempo

door te gaan.

Gezien de aannamen die bij de berekeningen zijn gedaan en twijfelachtig werden genoemd, en de korte perioden waarop de berekeningen betrekking hadden, wordt aan de berekeningen een geringe betrouwbaarheid toegekend. De kuberingen worden betrouwbaarder en nauwkeuriger geacht, omdat deze zijn gebaseerd op waarnemingen en op een veel langere periode betrekking hadden.(10 jaar)

Daarom worden in dit rapport de aanzandingsgebieden zoals gevonden met de kuberingen verder behandeld.

Daarbij kan men zich afvragen of de aanzanding de komende jaren door zal gaan. De aanzanding vond plaats in de tien jaar na de afsluiting van het Haringvliet en het Brouwershavensche Gat. Uit deze zeearmen kan het aangevoerde zand niet afkomstig zijn. Het zand kan echter wel uit de Oosterschelde of uit de Noordzee zeewaarts van de NAP -10,00 m-lijn zijn aangevoerd. (Hoofdstuk 2)

Indien het zand afkomstig is uit de Oosterschelde, dan zal de aanzanding zeker minder worden door de gedeeltelijke afsluiting van deze zeearm. Onderzoek naar de herkomst van het zand is noch in dit rapport, noch elders gedaan. Een dergelijk onderzoek is echter wel van groot belang voor het antwoord op de vraag of de gevonden aanzandingsgebieden bij herhaling als wingebied kunnen worden gebruikt.

#### 4.5. Andere wingebieden

In paragraaf 2.2. werd de erosie van de Kop van Goeree toegeschreven aan de geul "het Schaar". (fig. 2) Deze geul dringt steeds verder naar de kust op. (fig. 7) Men zou kunnen overwegen om de geulwand aan de zeezijde als wingebied te gebruiken. De geul komt dan verder uit de kust te liggen en de erosie van de kust zou kunnen verminderen.

Het is al moeilijk om betrouwbare transportberekeningen te maken voor het Schaar (zie Hoofdstuk 2), laat staan, dat men de gevolgen van de bovenbeschreven ingreep zou kunnen voorzien. De vrees

bestaat, dat door zo'n ingreep - eigenlijk een verbreding van het Schaar - het debiet in het Schaar en daarmee erosie van de kust zal toenemen. Bovendien mag men niet te diep zuigen bij het geul-talud, omdat anders het strand en de duinen zouden kunnen worden ondermijnd.

Een grondige studie naar de gevolgen van de ingreep kan evenwel interessante resultaten opleveren voor het toekomstig beheer van de Kop van Goeree. Mede omdat de werkomstandigheden, waar-over het volgende hoofdstuk handelt, in het hierboven genoemde wingebed voor de punaise optimaal lijken.

## 5. BEOORDELING WINGEBIEDEN

### 5.1. Inleiding

Om het meest aantrekkelijke wingebied van figuur 39 aan te kunnen wijzen, worden in dit hoofdstuk de werkomstandigheden in de wingebieden A, B, C en D vergeleken. Achtereenvolgens komen aan de orde:

- afstand winput tot het stort.
- bereikbaarheid van de winput.
- aanzanding van de winput.
- aanzanding en/of erosie van de kust.
- stabiliteit van de winput en omgeving.
- invloed op het milieu.
- metingen in de winput.
- korreldiameters en slibgehalte in de winput.
- het aantal verplaatsingen van het werktuig.
- energievoorziening.
- vervuiling in de wingebieden.
- gevaar en/of hinder door ankerdraden en leidingen.
- golfklimaat en stroomsnelheden.
- verankeringsmogelijkheden.
- afmetingen van de winput.

Dit lijstje is ontleend aan het dictaat "Randvoorwaarden voor de inzet van baggerwerktuigen" (lit. 12) Tenslotte wordt een schematisch overzicht van de werkomstandigheden gegeven en besproken. Op grond hiervan wordt een voorlopige voorkeur voor één wingebied uitgesproken.

### 5.2. Werkomstandigheden die de keuze van het wingebied beïnvloeden

#### 5.2.1. Afstand winput tot het stort

In de onderstaande tabel 5.2.1 zijn de afstanden van de centra van de wingebieden tot het centrum van het stort weergegeven. (fig. 35)

wingebied	A	B	C	D
afstand tot het stort (km)	7	5	3	1,3

Tabel 5.2.1

Omdat het werktuig slechts over een afstand van één kilometer kan persen, is een opjaagstation in alle vier de gevallen noodzakelijk. Het opjaagstation voor de wingebieden A, B en C zal in ieder geval op zee moeten worden geplaatst. Indien de pompcapaciteit van het werktuig iets zou worden opgevoerd, dan zou het opjaagstation voor wingebied D op het strand kunnen worden geplaatst.

Het onderhoud en de fundering van een walstation zijn eenvoudiger en goedkoper dan van een opjaagstation in zee. Wingebied D is daarom aantrekkelijker dan de wingebieden A, B en C. Wingebied A is het minst aan te bevelen in verband met de grootste afstand tot het stort, waardoor meer energie voor het persen noodzakelijk is.

#### 5.2.2. Bereikbaarheid van de winput

De wingebieden zijn eigenlijk zandbanken. Het zou aantrekkelijk zijn om het werktuig achter de kruin van de bank te leggen, omdat hier de golfaanval geringer is dan aan de zeezijde van de bank.

De bodem achter de banken ligt op ca. NAP -2,00 m. Het werktuig heeft een diepgang van 1,25 m. Met een GLW van NAP -0,80 m en GHW van NAP +1,30 m is vrijwel de gehele getijperiode beschikbaar om het werktuig op zijn plaats te manoeuvreren.

De kruinhoogte in de gebieden B, C en D is achtereenvolgens NAP -0,70 m, -0,50 m en -0,50 m. Om het werktuig achter de kruin van deze banken te krijgen moet er achter de banken worden omgevaren. Er is namelijk te weinig tijd met voldoende water boven de bank om met het werktuig over de bank te varen. Bij zware weersomstandigheden zijn de uitwijkmogelijkheden beperkt. De hulpvaartuigen zitten tussen de banken en het strand ingesloten.



Hieraan kan worden tegemoet gekomen door het werktuig aan de zeezijde van de bank te laten werken. Dit heeft weer als nadeel dat de golfkrachten op het werktuig groter zijn.

De kruinhoogte in wingebed A is gelegen op NAP -2,00 m en daarvoor goed bereikbaar. Uit dit oogpunt gaat de voorkeur uit naar wingebed A. Door de grillige bodemvorm t.p.v. wingebed D is het manoeuvreren hier extra moeilijk. Daarom is wingebed D het minst aantrekkelijke gebied.

### 5.2.3. Aanzanding van de winput

In hoofdstuk 2 werd beschreven hoe zand aan de zeezijde van de "Ooster" wordt losgemaakt uit de bodem en door de golven over de hogerliggende bank heen wordt getransporteerd. Achter de banken bezinkt het zand omdat de golven daar lager zijn. Met ladingen en verschilkaarten werd de aanzanding achter de banken bevestigd. (hoofdstuk 4)

Wanneer achter de banken een put wordt gezogen, dan zal dit plaatselijk tot een verlaging van de bank leiden. Het bovenbeschreven proces kan dan niet meer optreden, omdat niet meer aan de voorwaarde van een ondiepe plaats waar golven breken en de hoogte van de golven wordt gereduceerd, wordt voldaan. De winput zal daarom niet aanzanden door het zandtransport over de banken.

De winput kan wel gevuld worden door het langstransport. In hoofdstuk 6 is een model ontwikkeld, waarmee deze aanzanding van een winput kan worden berekend. In dit model zijn de binnenkomende langstransporten berekend met de Bijkerformule. Daarin komen de verschillende plaatsgebonden parameters voor, zoals stroomsnelheid, waterdiepte, ribbelhoogte, golfhoogte en de korreldiameters van het zand. Voor de potentiële wingebeden zijn die niet bekend. Onderlinge vergelijking van deze gebieden op basis van aanzanding van de winput is dus niet mogelijk.

Alvorens over de aanzanding een definitief oordeel te kunnen geven is een bepaling van de plaatsgebonden parameters uit de Bijker-



formule noodzakelijk.

#### 5.2.4. Aanzanding en/of erosie van de kust

In paragraaf 5.2.3. werd reeds geconstateerd dat door de verlaging van de zandbank het zandtransport over de banken af zal nemen. Mede omdat de verlaging slechts plaatselijk is, mag verwacht worden, dat dit geen of nauwelijks invloed zal hebben op de duinen van de Kop van Goeree.

In bijlage II is geconstateerd dat de kruinhoogte van de bank de belangrijkste parameter is voor de golfhoogte bij duinafslag. Wanneer de bank lager wordt door het zuigen van de winput, moet er met een grotere golfhoogte voor duinafslag worden gerekend. De ontwerpafslaglijn van figuur 27 zal bij een grotere golfhoogte, waarmee na het zuigen van de winput moet worden gerekend, minder gunstig komen te liggen.

Omdat de put weer vol zal lopen, zal dit effect slechts tijdelijk zijn. Bovendien is de verlaging van de bank plaatselijk. Door de diffractie die dan achter de bank op zal treden, zal de golfhoogte waarmee moet worden gerekend weer lager kunnen zijn. De invloed van de diffractie neemt toe met de afstand tot de verlaging in de bank. Op een zekere afstand is dit effect zo groot, dat de invloed van de verlaging van de bank op de golfhoogte nauwelijks merkbaar is.

Wingebied A ligt te ver uit de kust en te diep om enige invloed op de golfaanval op het strand uit te oefenen. Het zuigen van een winput in dit gebied zal dan ook geen gevolgen hebben voor de kust. Wingebied B ligt minder diep, maar ook op een te grote afstand uit de kust om merkbare invloed op de golfaanval op het strand uit te kunnen oefenen. Door diffractie blijft de golfhoogte, bij verlaging van de bank, nagenoeg gelijk. Gezien de geringe diepte in de wingebieden C en D en de korte afstand tot de kust, zijn beide van groot belang voor de reductie van de golfaanval op het strand. Wordt in één van deze gebieden een winput gezogen, dan zal de golfaanval op het strand groter worden. Omdat wingebied D dichter

bij de kust ligt dan C geldt dit voor wingebied D in hogere mate. De voorkeur gaat dan ook achtereenvolgens uit naar de wingebieden A, B, C en D.

#### 5.2.5. Stabiliteit van de winput en omgeving

Bij het zuigen zal het zand onder een hoek naar de zuigmond van het werktuig stromen. Na de winning zal de vorm van de put zich onder invloed van de golven en stroom snel aanpassen. Daar er in de directe omgeving van het wingebied geen waardevolle vaste objecten zijn gelegen, hoeft er niet voor schade t.g.v. instabiliteit te worden gevreesd.

Wel moet het opjaagstation op voldoende afstand van het werktuig worden geplaatst, zodat het niet door het bressen kan worden ondermijnd. Er zijn op dit punt geen verschillen tussen de wingebieden.

#### 5.2.6. Invloed op het milieu

Ter plaatse van de wingebieden wordt een enkele keer op garnalen gevestigd. Dit wijst erop dat er leven is in de wingebieden. Het zuigen van een winput zal een deel hiervan zeker vernietigen. Omdat geen uitspraak kan worden gedaan over de verschillende snelheden waarmee een winput in de afzonderlijke gebieden zal vollopen, kan evenmin worden gezegd hoe snel de natuur zich zal herstellen van de gevolgen van het zuigen van een winput. Hier is aangenomen, dat de natuur zich sneller herstelt als de winput sneller volloopt. De natuur op het stort zal eveneens worden verstoord. Doch deze verstoring is onafhankelijk van het wingebied. Samengevat kan er dus geen voorkeur worden uitgesproken voor één van de wingebieden.

#### 5.2.7. Metingen in de put

Om de door de aannemer verrichte werkzaamheden te verrekenen

zou de winput kunnen worden opgemeten. In wingebed A zijn er geen belemmeringen voor de diepgang van de meetwaartuigen te verwachten. De put zal slechts langzaam van vorm en inhoud veranderen onder invloed van stroom en golven. (zie 5.2.3.)

De wingebeden B, C en D zijn moeilijker te meten i. v. m. de beperkte waterdiepte en daardoor brekende golven. Men zal dan op gunstige getij- en weersomstandigheden moeten wachten om te kunnen meten. De golven en de stroom kunnen de put dan al behoorlijk hebben doen vervormen.

Voor dit punt geldt dat wingebed A de voorkeur heeft boven achtereenvolgens B, C en D.

#### 5.2.8. Korreldiameters en slibgehalte in de winput

In bijlage VI zijn twee boringen van de Rijks Geologische Dienst gegeven. Boring S6-5 valt in wingebed D (fig. 39), terwijl boring S6-4 een paar honderd meter ten westen van wingebed A ligt. De boordigrammen staan op de pagina's 51 t. m. 53.

Bij de strandsuppletie in '77 lag de mediane korreldiameter van het gesuppleerde zand tussen 150 en 250  $\mu\text{m}$ . (lit. 13) In verband met verliezen tijdens en kort na de suppletie wordt het suppleren van zand met een mediane korreldiameter kleiner dan 150  $\mu\text{m}$  ont-raden. In boring S6-4 zijn er twee lagen met een  $D_{50}$  kleiner dan 150  $\mu\text{m}$ . De eerste op NAP -9,00 m tot NAP -10,10 m en de tweede op NAP -14,00 m tot NAP -19,16 m.

Indien ter plaatse van boring S6-4 een put wordt gezogen tot NAP -14,00 m, dan zal de eerste laag zich door het bressen mengen met de lagen met een grotere  $D_{50}$ . Hierdoor zal de  $D_{50}$  bij het stort 150  $\mu\text{m}$  of meer kunnen zijn. De tweede laag lijkt te dik, ca. vijf meter, om te kunnen worden gemengd, zodat de  $D_{50}$  van het gesuppleerde zand kleiner dan 150  $\mu\text{m}$  zal zijn. Boring S6-4 lijkt daarom geschikt tot NAP -14,00 m.

Ten tijde van boring S6-5 lag de bodem op NAP -3,30 m. Volgens

de loding ligt de bodem nu ('82) op NAP -2,00 m. Er is in de tussenliggende periode dus 1,3 m zand bijgekomen. Een kaart met bodemmonsters van het Haringvliet uit '76-'77 laat zien dat de D<sub>50</sub> in het wingebied D schommelt tussen de 250  $\mu\text{m}$  en 300  $\mu\text{m}$ . Het slibgehalte van de bodemmonsters is nul. (Dit geldt overigens ook voor de wingebieden B en C.) Verwacht mag worden dat deze diameters niet alleen aan de bodem gelden, maar ook voor de laag van 1,3 m boven boring S6-5.

Vanaf NAP -5,20 m tot NAP -7,90 m is de D<sub>50</sub> kleiner dan 150  $\mu\text{m}$ . (S6-5) De menging door bressen met lagen met grotere D<sub>50</sub> zal minder zijn dan bij de eerste laag van boring S6-4, die slechts één meter dik was. Beneden NAP -7,90 m is de D<sub>50</sub> veel groter dan 150  $\mu\text{m}$ . Het is dan ook raadzaam om hier dieper te zuigen dan NAP -7,90 m.

Het slibgehalte in de beide boringen S6-4 en 5 varieert van laag tot laag. De beide boringen bevatten daarnaast enkele kleilagen, variërend in dikte van 5-37 cm. Deze kleilagen kunnen de watertoevoer naar de onderliggende zandlagen belemmeren en daarmee het zuigproces verstoren.

Daar één boring in wingebied D met een oppervlakte van 0,6 km<sup>2</sup> niet representatief voor het gehele gebied mag worden geacht, kunnen geen conclusies over de geschiktheid van dit gebied worden getrokken. Voor de wingebieden B en C is men aangewezen op de kaart met bodemmonsters. Voor wingebied A zou men de boring S6-4 kunnen gebruiken, al ligt deze daar een paar honderd meter vandaan. Deze gegevens zijn te gebrekkig om een goede vergelijking te maken tussen de verschillende wingebieden op grond van de korreldiameters en slibgehalten. Nader onderzoek naar deze gegevens in de vier wingebieden is voor een goede vergelijking noodzakelijk.

DIEPTE ONDERKAM LAAG IN M : N	KLEURCODE	GRONDSOORT	IN M GESCHAT	
			GRENZEN	GEM. DIAM.
5,17- 5,22-	C	zand met weinig stukjes schelp leeg	125-210	175
7,57-	C	zand met weinig schelpenresten	125-210	175
8,32-	C	zand met enkele stukjes klei	105-175	150
8,35-	C	leeg		
8,65-	C	zand, enkele stukjes klei en een spoor veen	105-175	150
9,00-	C	zand	105-175	150
9,20-	C	zand met enkele stukjes klei	105-175	125
9,31-	C	zand, stukjes klei en enkele schelpen	105-175	125
9,40-	C	leeg		
9,75-	A	zand, laagjes klei, enkele schelpen en een spoor veen	105-175	125
10,10-	A	zand met enkele stukjes klei	105-175	125
10,12-	A	leeg		
11,00-	A	zand, enkele laagjes klei, stukjes klei en enige schelpen	125-210	175
11,30-	A	zand met enkele stukjes schelp	125-210	175
12,00-	A	zand, zeer veel stukjes klei en op 11,80- schelpengruis	125-210	175
12,37-	A	zand, laagjes klei en stukjes klei	175-350	250
12,54-	A	zand	175-350	250
13,00-	A	zand, zeer veel stukjes klei, laagjes klei, schelpenresten en weinig sporen veen	175-350	250
13,13-	A	zand, weinig laagjes klei en veel schelpen	175-350	250
13,28-	A	klei met laagjes zand		
13,84-	A	zand, enkele stukjes klei en weinig schelpenresten	175-350	250

M.V. / BODEM-4,85 m-N.A.P.

LABORATORIUM VOOR GRONDMECHANICA TE DELFT	
BORINGEN NOORDZEE X:-114.200 Y:-38.300	BILLAGES B25W853
BOORBESCHRIJVING: 42E 1-1	A <sub>1</sub>
	CO-16456 27

DIEPTE ONDERKAM LAAG IN M : N	KLEURCODE	GRONDSOORT	IN M GESCHAT	
			GRENZEN	GEM. DIAM.
14,30-	C	zand, enkele laagjes klei en een schelp	75-125	100
14,40-		kleihoudend zand	60-105	90
14,74-		zand, zeer veel laagjes klei en enkele sporen veen	60-105	90
15,00-		leeg		
16,18-		sterk kleihoudend zand, laagjes zuiver zand en enkele schelpen	60-105	70
17,08-		slibhoudend zand, stukjes klei en enkele schelpen	75-125	70
17,12-		leeg		
17,35-		slibhoudend zand, stukjes klei en schelpen	75-125	70
17,77-		slibhoudend zand, stukjes klei en enkele schelpen	75-125	90
17,80-		leeg		
17,16-		slibhoudend zand, stukjes klei, laagjes klei en weinig schelpen- resten	75-125	70
19,20-		leeg		
19,56-	B	weinig slibhoudend zand, stukjes klei en schelpen	150-250	200
19,65-	C	zand	150-250	200
19,85-	BC	zand, enkele stukjes klei en veel schelpenresten	150-250	200
19,90-		leeg		
20,18-	C	zand	150-250	200
20,26-		leeg		
20,71-	C	zand met enkele stukjes schelp	150-250	200

M.V. / BODEM-4,85 m-N.A.P.

LABORATORIUM VOOR GRONDMECHANICA TE DELFT	
BORINGEN NOORDZEE X:-114.200 Y:-38.300	BILLAGES B25W853
BOORBESCHRIJVING: 42E 1-1	A <sub>1</sub>
	CO-16456 28

56-4  
0.L. 3° 44' 00"  
idem Waaierijve 4,85 m-N.A.P.



DIEPTE OMDERK. LAAG IN E	KLEURCODE	GRONDSOORT	GESCHAT	
			GRENZEN	GEM. DIAM.
20,74-		leeg		
21,70-	C	zand met een stukje schelp	150-250	200
21,80-	C	zand met enkele stukjes klei	150-250	200
22,25-	C	zand	150-250	200
23,02-	C	zand met schelpenresten	150-250	200
23,06-		leeg		
23,24-	C	schelprijk zand	105-175	150
23,6-	C	zand, enkele laagjes slib, enkele sporen veen en enkele schelpen	105-175	150
23,74-		leeg		
24,00-	C	zand, enkele laagjes slib en een spoor veen	105-175	150
24,70-	C	zand met enkele laagjes slib	105-175	150
25,30-	C	zand	105-175	150
25,44-	C	zand met enkele bandjes slib	175-420	350
25,50-		leeg		
25,68-	C	zand	105-175	150
25,74-		veen		
25,81-	C	zand met een spoor veen	175-420	350

MW / BODEM- 4,85m-N.A.P.

LABORATORIUM VOOR GRONDMECHANICA TE DELFT

BORINGEN NOORDZEE	X:-114.200	Y:-38.300		
BOORBESCHRIJVING: 42E1-1			A <sub>1</sub>	
		BUREAU		
		B29WB53		
		CO-16456		29

1955

DIEPTE IN m ±	NAP	GRONDSOORT	in µm geschat	ZANDFRACIE
4.00-		zand, een schelp en schelpenresten		125-210-150
5.00-		zand, weinig schelpen en enige schelpenresten		125-210-150
5.22-		zand met schelpen		125-210-150
5.28-		iets slibhoudend zand		75-125-100
5.39-		slibhoudend zand, enige dunne laagjes klei en stukjes klei		90-150-125
5.76-		zand, enige dunne laagjes klei, enkele stukjes klei en weinig schelpenresten		90-150-125
5.77-		leeg		
5.87-		zand, stukjes klei, een schelp en schelpenresten		90-150-125
5.95-		klei		
6.00-		zand met enige dunne laagjes klei		90-150-125
6.21-		zand met enkele sporen klei		90-150-125
6.39-		zand met laagjes klei		90-150-125
6.48-		leeg		
6.80-		zand met enige dunne laagjes klei		90-150-125
6.83-		leeg		
7.10-		zand met enige laagjes klei		90-150-125
7.18-		leeg		
7.90-		zand, dunne laagjes klei, stukjes klei en enige sporen veen		90-150-125
7.98-		zand		105-175-150
8.00-		leeg		
9.00-		zand met verspreide stukjes klei		105-175-150
9.76-		zand, enige dunne laagjes klei en enkele stukjes klei		105-175-150
10.33-		zand, veel dunne laagjes klei en enige sporen veen		105-175-150
10.74-		zand met weinig stukjes klei		105-175-150
10.86-		iets slibhoudend zand, weinig stukjes klei en enige sporen veen		105-175-150
BODEM ± 3,33m-N.A.P.				

LABORATORIUM VOOR GRONDMECHANICA TE DELFT

BORINGEN NOORZEE	X:-106.400	Y:-36.400		
BORING : 36G 20A (36 G 25-7)			A <sub>1</sub>	
		BUREAU		
		B29WB53		
		CO-16456		-31-

1955

DIEPTE IN m ± NAP	GRONDSOORT	ZANDFRACTIE in µm geschat
10.99-	zand	150-250-210
11.00-	leeg	175-350-250
11.34-	zand, weinig stukjes klei en enige sporen veen	175-350-250
11.42-	klei	175-350-250
11.64-	zand, laagjes klei en enige sporen veen	175-350-250
11.86-	zand met een laagje klei	175-350-250
11.95-	klei met schelpen	175-350-250
12.32-	zand met weinig stukjes klei	90-150-125
12.58-	iets slibhoudend zand, stukjes klei en enkele dunne laagjes veen	175-350-250
13.00-	zand, enige stukjes klei en enkele schelpen	175-350-250
13.18-	zand, dunne laagjes klei en stukjes klei	175-350-250
13.60-	zand, enkele stukjes klei en enige schelpenresten	175-350-250
13.76-	slibhoudend zand, laagjes veen en een schelpje	90-160-125
14.00-	zand, stukjes klei, schelpen en een stukje hout	250-420-350
14.32-	zand, enkele dunne laagjes klei, enige stukjes klei en enkele schelpen	250-420-350
15.00-	zand, enkele stukken schelp en enige sporen veen	125-210-175
15.68-	zand, sporen veen, sporen klei en een schelp	125-210-175
16.00-	zand met enkele stukken schelp	175-350-275
16.11-	zand, een schelp en enige stukjes klei	175-350-275
16.37-	klei, schelpen en enige insluitingen van zand	
16.61-	zand, grote stukken klei, schelpen, en een zeer grote schelp ( 7 cm.)	250-420-275

BODEM = 3.33 m - NAP

LABORATORIUM VOOR GRONDMECHANICA TE DELFT		
BORINGEN NOORDZEE	X=106400 Y= 36400	BUREAU B229W853
BORING : 36G 25-7	A,	CO-16456 -33-

DIEPTE IN m ± NAP	GRONDSOORT	ZANDFRACTIE in µm geschat
17.00-	zand, zeer veel schelpen en schelpenresten	250-420-275
17.27-	zand, enkele laagjes klei en enige schelpen	250-420-275
18.00-	zand, schelpen en schelpenresten	250-420-350
19.00-	zand, enkele schelpen en enige sporen klei	125-250-175
20.48-	zand met verspreide sporen slib	125-250-175
22.00-	zand, zeer veel schelpen en schelpenresten	300-500-400
22.45-	zand, enkele sporen klei, weinig kleine schelpen en schelpenresten	175-350-250
22.66-	klei	
22.85-	zand, enige zeer dunne laagjes klei en enkele sporen veen	90-150-125
22.92-	veen	
23.12-	zand met enige sporen veen	150-250-210
23.20-	veen	
23.28-	leeg	
23.59-	zand, enkele laagjes klei en enige resten veen	150-250-210
23.62-	leeg	
25.05-	zand, enkele laagjes klei en enige sporen veen	

BODEM = 3.33 m - NAP

LABORATORIUM VOOR GRONDMECHANICA TE DELFT		
BORINGEN NOORDZEE	X=106400 Y= 36400	BUREAU B229W853
BORING : 36G 25-7	A,	CO-16456 -33-



### 5.2.9. Benodigd aantal verplaatsingen van het werktuig

Als het werktuig eenmaal verankerd is, kunnen de ankerdraden m.b.v. lieren worden ingehaald en/of gevierd, zodat het werktuig over kleine afstanden kan worden verplaatst. De bediening van de lieren geschiedt op afstand.

Moet er echter over grotere afstanden worden verplaatst, dan moeten de ankers eveneens worden verplaatst door hulpvaartuigen. De bereikbaarheid van het wingebied wordt dan weer van doorslaggevend belang.

In gebied D ligt het werktuig juist zo ver uit de kust, dat het werktuig het gewonnen sediment net naar de kust kan persen. Daar komt een opjaagstation dat het sediment naar het stort perst. Door deze opstelling kan het werktuig slechts een cirkelboog beschrijven t.o.v. het opjaagstation. Hierdoor worden de verplaatsingsmogelijkheden in wingebied D beperkt.

Gezien de betere bereikbaarheid verdient wingebied A de voorkeur boven B, C en D. De wingebieden B en C zijn op hun beurt weer aantrekkelijker dan wingebied D.

### 5.2.10. Energievoorziening

Zowel de pomp van het werktuig als de pomp van het opjaagstation worden aangedreven door een elektromotor. Deze motoren worden gevoed via een hoogspanningskabel. De energieverliezen die optreden t.g.v. de kabellengte zijn te verwaarlozen. Van groot belang is wel de persafstand. De energiebehoefte neemt met de persafstand toe. Deze persafstand loopt af van A via B, C naar D. Uit dit oogpunt verdient D de voorkeur boven achter eenvolgens C, B en A.

### 5.2.11. Vervuiling wingebieden

Door verlies van deklast van zeeschepen en losgeslagen materiaal van de Deltawerken kan er materiaal voor de zuigmond van het werktuig komen waardoor deze verstopt raakt. Als dit gebeurt, zal men

met een hulpvaartuig naar het baggerwerktuig moeten varen om de zuigmond vrij te maken.

Helaas zijn er geen gegevens bekend over de mate van vervuiling in de wingebieden. Het enige criterium waarop moet worden teruggevallen is dan de bereikbaarheid van het wingebied. De voorkeur gaat dan uit naar wingebied A, terwijl de wingebieden B, C en D gelijkwaardig zijn.

#### 5.2.12. Gevaar/hinder door ankerdraden en leidingen

Ankerdraden en pijpleidingen lopen bij gebruik de kans te breken. Als een ankerdraad breekt, zal hij veel van wat er op zijn weg komt vernielen. Dit brengt risico's met zich voor de directe omgeving. Omdat de verankering in alle gevallen in zee zal worden uitgevoerd, zijn deze risico's in alle gevallen gelijk.

Vanuit wingebied D wordt de persleiding via het opjaagstation 800 m langs de duinen naar het stort gevoerd. Vanuit de wingebieden A, B en C gaat de persleiding via het opjaagstation direct naar het stort met een veel kortere landleiding. De hinder die de landleiding op het strand veroorzaakt is voor wingebied D dus groter dan voor de overige wingebieden.

De kans op leidingbreuk is in de brandingszone het grootst. In alle vier gevallen moet de leiding door de geul het Schaar en de brandingszone naar het strand worden gevoerd. De hiermee gepaard gaande risico's zijn voor alle wingebieden dan ook gelijk. De lengte van de leiding in zee speelt echter ook een rol. Hoe langer de leiding in zee, hoe groter de kans op breuk. Uit dit oogpunt wordt gebied D dan ook aanbevolen boven achtereenvolgens C, B en A.

Gezien de hinder van een 800 m lange landleiding is wingebied D niet aan te bevelen. Daar de risico's met een leiding in zee zwaarder wegen dan de hinder van een landleiding, gaat de voorkeur toch uit naar achtereenvolgens D, C, B en A.

### 5.2.13. Golfklimaat en stroomsnelheden bij het werktuig en de leiding

De stroomsnelheden t.p.v. de vier wingebieden en de geul het Schaar (waar de leiding door moet) liggen in de orde van 1 m/s. Duidelijke verschillen tussen de wingebieden zijn er niet te onderscheiden.

Het golfklimaat in de wingebieden is afhankelijk van de waterdiepte. In wingebied A ligt de bodem op NAP -2,00 m. In de wingebieden B, C en D is dat ca. NAP -0,5 m. De gemiddelde waterstand is ca. NAP +0,5 m. In de wingebieden B, C en D zal dan vrijwel zeker golfbreking optreden. In wingebied A is de kans op brekende golven weliswaar kleiner doch niet nul, Indien in wingebied A een golf breekt, dan is de belasting op het werktuig groter dan de last van een brekende golf in de overige wingebieden. De problemen van brekende golven in het wingebied kunnen in alle gevallen worden omzeild door achter de kruin van de bank te gaan werken.

Het golfklimaat bij de pijpleiding is met name in de brandingszone van belang. Vanuit alle wingebieden loopt de leiding door de brandingszone. Verschillen tussen de wingebieden zijn er op dit punt dan ook niet te verwachten.

Wingebied A is het minst aantrekkelijke wingebied i.v.m. de grotere te verwachten golfbelasting op het werktuig dan in de wingebieden B, C en D.

### 5.2.14. Verankeringsmogelijkheden

Het werktuig wordt door vier ankerdraden en de persleiding op zijn plaats gehouden. De ankers worden door hulpvaartuigen uitgebracht en voorzien van een boei. Later zal de verbinding tussen het werktuig en het anker tot stand worden gebracht. In wingebied A zijn hierbij geen moeilijkheden te verwachten, omdat er voldoende water staat voor de diepgang van de hulpvaartuigen.

In de wingebieden B, C en D zullen twee ankers aan de zeezijde van

de bank en twee ankers achter de kruin van de bank worden uitgebracht. Er moet voor de koppeling van ankers aan het werktuig op hoog water en rustig weer worden gewacht.

Door de grillige bodemvorm in en om het wingebied D zal het manoeuvreren hier nog moeilijker zijn dan in de gebieden B en C.

Uit het oogpunt van verankering gaat de voorkeur uit naar achter-eenvolgens de wingebieden A, B, C en D.

#### 5.2.15. Afmetingen van de winput

De afmetingen van de winput zijn o.a. afhankelijk van de breshellingen en het bodemprofiel. De natuurlijke hellingen die door de golfwerking zijn ontstaan variëren van 1:10 tot 1:50 in de wingebieden. Bij een toenemende diepte zal er van de golfwerking op de bodemhellingen steeds minder te merken zijn. Als parameter voor deze invloed zou de horizontale snelheid t.g.v. de golfbeweging aan de bodem kunnen worden gehanteerd. In bijlage VIII is berekend, dat de horizontale bodemsnelheid bij een diepte van 5 m nog ca. 70% van de horizontale snelheid van het oppervlak bedraagt en bij een diepte van 10 m nog ca. 40%.

Bij grotere diepten kan van stil water worden uitgegaan. In stil water zullen de hellingen steiler zijn. Volgens bijlage IX variëren de breshellingen dan van 1:5 tot 1:20.

In bijlage X zijn bij putdieptes van 10 en 20 m verschillende putvormen gegeven, Dieper zuigen dan 20 m lijkt niet wenselijk. Afhankelijk van de optredende breshellingen zal een bepaalde putvorm worden gezogen, waarbij het werktuig verplaatst zal moeten worden.

Omdat exacte gegevens over breshellingen in de door golven beïnvloede zone en over de bodemprofielen in de wingebieden ontbreken, kan niet worden bepaald hoe de putvorm van ieder wingebied er uit zal zien. Wel kan worden geconstateerd, dat er in de wingebieden A en B ruimte is om het werktuig te verplaatsen,

indien de bres uit het wingebied zou lopen. In de wingebieden C en D is deze ruimte niet aanwezig. Daarom verdienen de gebieden A en B de voorkeur boven de gebieden C en D.

### 5.3. Keuze van het wingebied

Hieronder, in tabel 5.3, is de beoordeling van de werkomstandigheden in de wingebieden A, B, C en D samengevat. Een plus duidt in deze tabel aan dat het betreffende wingebied voor die omstandigheid beter geschikt is dan het gebied met een nul. Een wingebied met een min geeft aan dat het gebied voor die omstandigheid minder geschikt is dan het gebied met een nul. Indien voor een werkomstandigheid geen voorkeuren werden uitgesproken kregen alle wingebieden een nul.

Overzicht werkomstandigheden in de wingebieden

omstandigheden/wingebied	A	B	C	D
afstand winput-stort	-	0	+	+
bereikbaarheid wingebied	+	0	0	-
aanzanding winput	0	0	0	0
aanzanding/erosie kust	+	0	-	-
stabiliteit winput e.o.	0	0	0	0
invloed op het milieu	0	0	0	0
meting in de put	+	0	0	-
D <sub>50</sub> en slibgehalte	0	0	0	0
aantal verplaatsingen	+	0	0	-
energievoorziening	-	0	+	+
vervuiling wingebieden	+	0	0	0
gevaar/hinder omgeving	0	0	0	-
golfklimaat en stroom	-	+	+	+
verankeringsmogelijkheden	+	0	0	-
afmetingen van de put	0	0	0	0

Tabel 5.3

Over vijf van de vijftien vergeleken werkomstandigheden is geen uitspraak gedaan. Met name de korreldiameters van het zand in de wingebieden zijn van belang voor de keuze van één van de wingebieden. Om een verantwoorde keuze te kunnen doen is een gedetailleerd grondonderzoek dan ook noodzakelijk. Een dergelijk onderzoek valt echter buiten het kader van dit afstudeerverslag.

Op basis van de werkomstandigheden waarover wel een uitspraak is gedaan, komt wingebied A als het meest geschikt naar voren. Voor zes werkomstandigheden bleek wingebied A het meest geschikt. Daar stonden slechts drie negatieve punten tegenover. De overige wingebieden hadden minder pluspunten, terwijl wingebied D bovendien meer negatieve punten had.

Voor een meer afgewogen oordeel zou men een gewicht aan de verschillende werkomstandigheden toe moeten kennen en ook de verhouding in geschikt zijn van de wingebieden per omstandigheid moeten bepalen. Om een eerste keuze te doen leek de hier gehanteerde methode te voldoen.

Verwacht mag worden dat, mits het te winnen zand geschikt is, de kosten van de uitvoering van de zandsuppletie de doorslag zullen geven bij de keuze van het wingebied. Daarom wordt aangeraden een studie te doen naar de kosten bij gebruik van het meest geschikte wingebied A. Door hetzelfde te doen voor het minst geschikte wingebied D, kan worden gezien hoeveel meer er voor de aantrekkelijkere werkomstandigheden in wingebied A ten opzichte van wingebied D zou moeten worden betaald.



## 6. AANZANDING VAN DE WINPUT IN WINGEBIED A

### 6.1. Inleiding

In dit hoofdstuk is een methode gezocht waarmee door een eenvoudige handberekening snel een inzicht kan worden verkregen in de aanzanding van een winput in de loop van de tijd. (De term handberekening moet niet al te letterlijk worden opgevat, het gebruik van een programmeerbare rekenmachine bleek onontbeerlijk.) De methode is toegepast op een winput gezogen in wingebied A (fig. 39), omdat dit wingebied als het meest geschikte naar voren is gekomen in hoofdstuk 5. Uit het verloop van de aanzanding is opgemaakt hoe lang het duurt eer de oorspronkelijke situatie in het wingebied zal zijn hersteld. Als het zandtransport dat de winput binnentreedt, en de stroomsnelheden in de winput bekend zijn, kan de aanzanding worden berekend met het "eenvoudige" model van Boeters. (Boeters heeft ook een gecompliceerder model ontwikkeld.)

Het binnenkomend transport is berekend met de Bijkerformule, die met de invloed van zowel golven als stroom rekening houdt. In paragraaf 6.2.1. is deze formule beschreven. Alvorens de Bijkerformule kan worden toegepast, moeten de bodemligging, het golfklimaat en de waterstands-, stroomsnelheids- en stroomrichtingskrommen in wingebied A worden bepaald. Omdat het hier gaat om een handberekening zijn deze parameters in paragraaf 6.2.2. geschematiseerd. De resultaten van de berekeningen die in bijlage XI zijn uitgevoerd worden in paragraaf 6.2.3. besproken.

In paragraaf 6.3.1. zijn twee eenvoudige handmatige modellen voor het berekenen van het stroombeeld in een rechte oneindig lange geul aangehaald. Op grond van literatuuronderzoek en de gegevens van de geschematiseerde winput is het model VXCST als werkmodel gekozen. Om na te gaan of van dit model betrouwbare resultaten mochten worden verwacht, is het eerst toegepast voor een bekende geul. De resultaten hiervan zijn in paragraaf 6.3.2. gegeven en vergeleken met die van het betrouwbare computermodel ODYSSEE van het W.L. Daaruit blijkt dat de uitkomsten van het



model VXCST betrouwbaar zijn. Daarom is het stroombeeld in de winput met het model VXCST berekend en in paragraaf 6.3.3. besproken.

Voor de berekening van de aanzanding van de winput is het "eenvoudige" analytische model van Boeters, dat de aanzanding van rechte oneindig lange geulen beschrijft, gehanteerd. In paragraaf 6.4.1. is dit model beschreven. Omdat het model van Boeters de aanzanding op het benedenstroomse talud van de winput - waar de waterdiepte in de stroomrichting afneemt - niet kon beschrijven, is het model hiervoor in paragraaf 6.4.2. uitgebreid. In paragraaf 6.4.3. wordt aangegeven hoe het verloop van de aanzanding en de hersteltijd zijn berekend. In paragraaf 6.4.4. worden de resultaten van de in bijlage XII uitgevoerde berekeningen besproken. Tot besluit worden conclusies getrokken ten aanzien van het gehanteerde model en de geschiktheid van de inzet van de punaise in wingebed A voor een zandsuppletie op Goeree.

## 6.2. Zandtransporten in wingebed A

### 6.2.1. Bijkerformule voor zandtransport (lit. 14)

Bijker gaat er van uit dat zandtransport in kustgebieden wordt veroorzaakt door een combinatie van golfwerking en stromen. Door de golforbitaalbeweging wordt zand uit de bodem losgemaakt en in suspensie gebracht. De stroom neemt het losgemaakte zand mee. De transportrichting is dus gelijk aan de stroomrichting.

Het totale zandtransport wordt onderscheiden in twee componenten, een bodemtransport en een zwevend transport.

$$S_t = S_b + S_s \quad (6.2.1)$$

Hierin is:

$S_t$  = totale zandtransport ( $m^2/s$ )

$S_b$  = bodemtransport ( $m^3/s$ )

$S_s$  = zwevend transport ( $m^3/s$ )

Het bodemtransport treedt op bij de bodem in een laagdikte  $r$ . Het zwevend transport treedt op in de laag daarboven. Bijker neemt voor de laagdikte  $r$  de ribbelhoogte.

Voor de berekening van het bodemtransport heeft Bijker de formule van Kalinske-Frijlink, die voor zandtransporten onder stroom is afgeleid, uitgebreid met de golfinvloed. Daartoe is in de exponent van (6.2.2) het kwadraat van de snelheid  $v$  vermenigvuldigd met

de term  $(1 + \frac{1}{2} (\zeta \frac{u_b}{v})^2)$ .

$$S_b = \frac{B D v \sqrt{g}}{C} \exp \left[ \frac{-0,27 \Delta D C^2}{\mu v^2 (1 + \frac{1}{2} (\zeta \frac{u_b}{v})^2)} \right] \quad (6.2.2)$$

Hierin is:

$B$  = constante (Bijker geeft hiervoor 5)

$D$  = korreldiameter van het zand (m)

(hiervoor wordt  $D_{50}$  gekozen)

$D_{50}$  = diameter van de zeef waardoor 50 gewichtsprocent van een zandmonster passeert (m)

$v$  = over de waterdiepte gemiddelde stroomsnelheid (m/s)

$g$  = versnelling van de zwaartekracht =  $9,81 \text{ (m/s}^2\text{)}$

$C$  = coëfficiënt van Chezy

$\Delta$  = relatieve dichtheid van zand

$$C = 18 \log \frac{12 h}{r} \quad (6.2.3)$$

Hierin is:

$h$  = waterdiepte (m)

$r$  = ribbelhoogte (m)

$$\Delta = \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} \quad (6.2.4)$$

Hierin is:

$\rho_s$  = dichtheid van zand ( $\text{kg/m}^3$ )

$\rho_w$  = dichtheid van water ( $\text{kg/m}^3$ )

$$\mu = \left( \frac{C}{C'} \right)^{3/2} \quad (6.2.5)$$

$$C' = 18 \log \frac{12 h}{D_{90}} \quad (6.2.6)$$

$D_{90}$  = diameter van de zeef waardoor 90 gewichts-  
procent van het zandmonster kan passeren (m)

$u_b$  = horizontale watersnelheid aan de bodem als  
gevolg van de golforbitaalbeweging (m)

$$\xi = C \sqrt{\frac{f_w}{2g}} \quad (6.2.7)$$

$f_w$  = parameter voor de schuifspanning aan de  
bodem onder golven

$$f_w = \exp \left[ -5,977 + 5,213 \cdot \left( \frac{a_b}{r} \right)^{-1,191} \right] \quad (6.2.8)$$

$a_b$  = amplitude van de horizontale waterverplaatsing  
aan de bodem als gevolg van de golforbitaalbeweging

De verdeling van de concentratie over de hoogte in de laag  $r$ , waar het bodemtransport optreedt, is constant. De concentratie  $c_b$  wordt berekend met:

$$c_b = \frac{S_b}{6,34 \cdot r \cdot \sqrt{\frac{\tau_c}{\rho_w}}} \quad (6.2.9)$$

Hierin is:

$c_b$  = concentratie van het zand aan de bodem

$\tau_c$  = schuifspanning onder stroom ( $N/m^2$ )

$$\tau_c = \rho_w \cdot g \cdot \frac{v^2}{C^2} \quad (6.2.10)$$

Het zwevend transport, dat optreedt boven de laag met bodemtransport, wordt berekend met:

$$S_s = \int_r^h v(z) c(z) dz \quad (6.2.11)$$

De  $z$ -as is vertikaal omhoog gericht. Het nulpunt valt samen met de bodem.

$v(z)$  = stroomsnelheid als functie van  $z$  (m/s)

$c(z)$  = concentratievertikaal

Voor de stroomsnelheid neemt Bijker een logaritmisch snelheidsprofiel. Voor de concentratievertikaal neemt Bijker de verdeling van Rouse:

$$c(z) = c_b \cdot \left( \frac{r}{h-r} \cdot \frac{h-z}{z} \right)^{z_*} \quad (6.2.12)$$

$$z_* = \frac{w \cdot \sqrt{\rho_w}}{\kappa \cdot \sqrt{\zeta_c} \left[ 1 + \frac{1}{2} \left( \zeta_c \cdot \frac{D_b}{v} \right)^2 \right]} \quad (6.2.13)$$

$w$  = valsnelheid van een korrel zand met een diameter  $D$  in zeewater (m/s)

Voor het berekenen van het zwevend transport volgens (6.2.11) met gebruik van het logaritmisch snelheidsprofiel en de vergelijkingen (6.2.12) en 6.2.13) wordt gebruik gemaakt van onderstaande tabel 6.2.1. In die tabel is de waarde van  $\frac{S_s}{S_b}$  in vergelijking (6.2.14) gegeven als functie van de parameters  $z_*$  en  $A$ .

$$S_s = \frac{S_s}{S_b} \cdot S_b \quad (6.2.14)$$

$$A = \frac{r}{h} \quad (6.2.15)$$

Table 6.2.1 Values of Einstein integral factors (all items are dimensionless)

r/h	$z_r = 0$			$z_r = 0.20$			$z_r = 0.40$			$z_r = 0.60$			$z_r = 0.80$			$z_r = 1.00$		
	Q	$S_s/S_b$	$S_t/S_b$	Q	$S_s/S_b$	$S_t/S_b$	Q	$S_s/S_b$	$S_t/S_b$	Q	$S_s/S_b$	$S_t/S_b$	Q	$S_s/S_b$	$S_t/S_b$	Q	$S_s/S_b$	$S_t/S_b$
$1 \times 10^{-5}$	$3.03 \times 10^5$	$5.54 \times 10^5$	$5.54 \times 10^5$	$3.28 \times 10^4$	$6.00 \times 10^4$	$6.00 \times 10^4$	$3.88 \times 10^3$	$7.10 \times 10^3$	$7.10 \times 10^3$	527.	964.	965.	88.0	161.	162.	20.0	36.6	37.6
$2 \times 10^{-5}$	$1.44 \times 10^5$	$2.63 \times 10^5$	$2.63 \times 10^5$	$1.79 \times 10^4$	$3.27 \times 10^4$	$3.27 \times 10^4$	$2.43 \times 10^3$	$4.44 \times 10^3$	$4.44 \times 10^3$	377.	689.	690.	71.6	131.	132.	17.9	32.8	33.8
$5 \times 10^{-5}$	$5.36 \times 10^4$	$9.80 \times 10^4$	$9.80 \times 10^4$	$7.98 \times 10^3$	$1.46 \times 10^4$	$1.46 \times 10^4$	$1.30 \times 10^3$	$2.37 \times 10^3$	$2.37 \times 10^3$	239.	438.	439.	53.6	98.0	99.0	15.4	28.2	29.2
$1 \times 10^{-4}$	$2.53 \times 10^4$	$4.63 \times 10^4$	$4.63 \times 10^4$	$4.32 \times 10^3$	$7.90 \times 10^3$	$7.90 \times 10^3$	803.	$1.47 \times 10^3$	$1.47 \times 10^3$	169.	310.	311.	42.7	78.2	79.2	13.6	24.9	25.9
$2 \times 10^{-4}$	$1.19 \times 10^4$	$2.18 \times 10^4$	$2.18 \times 10^4$	$2.33 \times 10^3$	$4.26 \times 10^3$	$4.26 \times 10^3$	496.	907.	908.	119.	218.	219.	33.9	62.0	63.0	11.9	21.8	22.8
$5 \times 10^{-4}$	$4.36 \times 10^3$	$7.98 \times 10^3$	$7.98 \times 10^3$	$1.02 \times 10^3$	$1.87 \times 10^3$	$1.87 \times 10^3$	260.	475.	476.	74.3	136.	137.	24.6	45.0	46.0	9.78	17.9	18.9
$1 \times 10^{-3}$	$2.03 \times 10^3$	$3.72 \times 10^3$	$3.72 \times 10^3$	545.	998.	999.	158.	290.	291.	51.2	93.7	94.7	19.1	34.9	35.9	8.36	15.3	16.3
$2 \times 10^{-3}$	940.	$1.72 \times 10^3$	$1.72 \times 10^3$	289.	529.	530.	95.6	175.	176.	35.1	64.2	65.2	14.6	26.7	27.7	6.99	12.8	13.8
$5 \times 10^{-3}$	336.	615.	616.	123.	226.	227.	48.5	88.7	89.7	20.8	38.1	39.1	10.0	18.3	19.3	5.38	9.84	10.8
0.01	153.	280.	281.	63.9	117.	118.	28.6	52.3	53.3	13.8	25.2	26.2	7.32	13.4	14.4	4.28	7.84	8.84
0.02	68.9	126.	127.	32.8	60.0	61.0	16.5	30.2	31.2	8.91	16.3	17.3	5.21	9.54	10.5	3.30	6.04	7.04
0.05	23.2	42.4	43.4	13.1	24.0	25.0	7.70	14.1	15.1	4.78	8.74	9.74	3.13	5.73	6.73	2.18	3.99	4.99
0.10	9.84	18.0	19.0	6.28	11.5	12.5	4.12	7.54	8.54	2.81	5.14	6.14	1.99	3.64	4.64	1.48	2.70	3.70
0.20	3.90	7.13	8.13	2.80	5.13	6.13	2.04	3.73	4.73	1.51	2.77	3.77	1.15	2.10	3.10	0.896	1.64	2.64
0.50	0.836	1.53	2.53	0.716	1.31	2.31	0.601	1.10	2.10	0.492	0.900	1.90	0.396	0.724	1.72	0.312	0.571	1.57
1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00

r/h	$z_r = 1.50$			$z_r = 2.00$			$z_r = 3.0$			$z_r = 4.0$			$z_r = 5.0$		
	Q	$S_s/S_b$	$S_t/S_b$	Q	$S_s/S_b$	$S_t/S_b$	Q	$S_s/S_b$	$S_t/S_b$	Q	$S_s/S_b$	$S_t/S_b$	Q	$S_s/S_b$	$S_t/S_b$
$1 \times 10^{-5}$	2.33	4.26	5.26	0.973	1.78	2.78	0.432	0.790	1.79	0.276	0.505	1.50	0.202	0.370	1.37
$2 \times 10^{-5}$	2.31	4.23	5.23	0.973	1.78	2.78									
$5 \times 10^{-5}$	2.28	4.17	5.17	0.967	1.77	2.77									
$1 \times 10^{-4}$	2.25	4.11	5.11				0.432	0.790		0.276	0.505				
$2 \times 10^{-4}$	2.21	4.04	5.04	0.967	1.77	2.77	0.431	0.789		0.275	0.504				
$5 \times 10^{-4}$	2.13	3.90	4.90	0.962	1.76	2.76	0.431	0.788		0.275	0.504				
$1 \times 10^{-3}$	2.05	3.76	4.76	0.951	1.74	2.74	0.430	0.787	1.79	0.275	0.503		0.370		
$2 \times 10^{-3}$	1.96	3.58	4.58	0.940	1.72	2.72	0.428	0.784	1.78	0.274	0.502		0.202	0.369	
$5 \times 10^{-3}$	1.78	3.26	4.26	0.907	1.66	2.66	0.424	0.776	1.78	0.273	0.499	1.50	0.201	0.367	1.37
0.01	1.62	2.96	3.96	0.869	1.59	2.59	0.417	0.763	1.76	0.270	0.494	1.49	0.199	0.364	1.36
0.02	1.42	2.59	3.59	0.809	1.48	2.48	0.404	0.740	1.74	0.264	0.483	1.48	0.195	0.357	1.36
0.05	1.10	2.02	3.02	0.694	1.27	2.27	0.374	0.684	1.68	0.249	0.456	1.46	0.186	0.341	1.34
0.10	0.836	1.53	2.53	0.568	1.04	2.04	0.339	0.620	1.62	0.236	0.432	1.43	0.181	0.332	1.33
0.20	0.552	1.01	2.01	0.414	0.758	1.76	0.317	0.580	1.58	--	--	--	--	--	--
0.50	0.174	0.319	1.32	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
1.00	0.00	0.00	1.00	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

6.2.2. Ingevoerde waarden van de parameters

Uit de vorige paragraaf 6.2.1. blijkt dat de waarde van vele parameters moet worden vastgesteld voordat het zandtransport met de Bijkerformule kan worden berekend. Daarom zijn hieronder met behulp van beschikbare gegevens de bodemligging, de waterstands-stroomsnelheids- en stroomrichtingskrommen en het golfklimaat in wingebed A geschematiseerd. Daarna zijn de waarden van de overige parameters bepaald.

#### - Bodemligging

Aan de hand van de kaart Mond Brouwershavensche Gat, lodingen februari - maart 1980 kan de zeer vlakke bodem van het wingebied A geschematiseerd worden met een vlak door 2 getekende evenwijdige dieptelijnen (fig. 40). De twee dieptelijnen zijn de NAP -3,0 en -4,0 m lijn. Ze liggen 500 m uit elkaar en maken een hoek van  $50^{\circ}$  met het noorden. De helling van de bodem is dus 1 : 500.

In het minst diepe deel van het wingebied, lokaal  $\approx$  NAP -2,5 m, zal de golfinvloed op de zandtransporten het grootst zijn. Verwacht mag worden dat de zandtransporten hier het grootst zullen zijn. Een winput zal dan ook in dit deel van het wingebied worden gezogen, omdat hij door de grotere transporten sneller aan zal zanden.

Om het totale transport in het wingebied A te berekenen, zouden er voor verschillende diepten transporten moeten worden berekend en gesommeerd. Bij de berekening van de aanzanding van de winput in paragraaf 6.4.3. is echter maar één dwarsdoorsnede beschouwd. Daarom zijn ook de zandtransporten voor slechts één dieptelijn (NAP -3,0 m) berekend. De bij deze dieptelijn berekende zandtransporten worden verondersteld de gemiddelde zandtransporten goed te benaderen.

#### - Waterstands-, stroomsnelheids- en stroomrichtingskromme

Voor het bepalen van de randvoorwaarden ten aanzien van de waterstanden is gebruik gemaakt van de getijkromme van de meetpaal Ha VI 1976 (fig. 39). Voor de stroomsnelheden en -richtingen is gebruik gemaakt van de stroom-, zout- temperatuur- en getijmeting die nabij de meetpaal Ha VI zijn gedaan op 20 maart 1970. De posities van de meetpaal en de stroommetingen staan in figuur 39 aangegeven.

In figuur 41 zijn de waterstandskromme en de over de diepte gemiddelde stroomsnelheden en -richtingen getekend. De bodem op de meetlocatie lag op NAP -8,0 m. Opvallend is dat de stroomrichting tijdens eb (3 uur na tot 4 uur voor H.W. H.v.H.) nauwelijks en tijdens vloed (2 uur voor tot H.W. H.v.H.) slechts weinig verandert.

Alleen tijdens de kentering (1 en 2 uur na H.W. H.v.H. en 3 uur voor H.W. H.v.H.) is de stroomrichting veranderlijk. De snelheden zijn dan echter gering (minder dan 0,25 m/s) en voor de zandtransporten van ondergeschikt belang.

Tijdens eb blijven de stroomsnelheid en de waterstand evenals de stroomrichting vrijwel constant. De situatie tijdens eb is dan ook geschematiseerd tot één periode waarin zowel de waterstand, stroomsnelheid als stroomrichting constant zijn. (fig. 42 en tabel 6.2.2.1.)

Tijdens vloed lopen de waterstand en de stroomsnelheid op, terwijl de stroomrichting nauwelijks verandert. De situatie tijdens vloed is daarom geschematiseerd in twee perioden. Eén periode met een lagere stroomsnelheid en waterstand en één periode met een hogere stroomsnelheid en waterstand. De stroomrichting is in beide perioden gelijk.

Getij	$T_i$ (uren t.o.v. ) (H.W. H.v.H.)	stroom- richting	stroom- snelheid (m/s)	waterstand t.o.v. NAP
eb	4N, 5N, 6N, 5V, 4V	250 <sup>0</sup>	0,50	-0,70
vloed	2V	55 <sup>0</sup>	0,30	+0,40
vloed	1V, H.W.	55 <sup>0</sup>	0,50	+1,10

Tabel 6.2.2.1.

(geschematiseerde waterstands-, stroomrichtings-  
en stroomsnelheidskromme, fig. 42)

De bodem in wingebied A ligt echter 5 m hoger op NAP -3,0 m, dan die bij meetpaal Ha VI. De stroomsnelheden en -richtingen zouden dan ook kunnen verschillen. Bij bestudering van één van de stroomrozen uit het rapport van Bakker en Speekenbrink (lit. 5), iets ten noorden van wingebied C (fig. 39), dus op grotere afstand dan meetpaal Ha VI van wingebied A, maar bij gelijke bodemligging bleek, dat vrijwel dezelfde stroomsnelheden en -richtingen waren gemeten. Voor de verdere berekening is dan ook voor wingebied A uitgegaan



van de hierboven geschematiseerde waarden voor de waterstand, stroomsnelheid en stroomrichting.

- Golfklimaat

Door golven zal zand van de bodem worden losgemaakt en in suspensie worden gebracht. Golven zijn dus van belang voor de transportberekening. Voor een eenvoudige transportberekening is het niet mogelijk om alle mogelijke golfhoogten in rekening te brengen.

Daarom zijn vier significante golfhoogten van de overschrijdingskromme van meetpaal BG V in beschouwing genomen. (fig. 43) De eerste golfhoogte wordt altijd overschreden en is gelijk aan nul. De golfhoogte die circa 50% van de tijd wordt overschreden, is 0,6 m. De golfhoogte die overeenkomt met enkele stormen per jaar (1%) is 2,6 m. Tenslotte is een tussenliggende waarde van 1,6 m gekozen die 7% van de tijd wordt overschreden. De transporten die bij deze golfhoogten horen, worden berekend. Om het totale transport te krijgen zal worden geïnterpoleerd tussen deze waarden.

De bodem bij de meetpaal BG V lag op NAP -11,0 m. De golfhoogte die daar werd geregistreerd, is dus niet gelijk aan de golfhoogte bij de NAP -3,0 m lijn. De golfhoogte bij deze dieptelijn kan wel uit de golven bij BG V met fig. 44 worden berekend als de periode van de golven bekend is. Hier is een periode van 5,4 s = representatieve periode van de golven bij het lichteiland Goeree, aangehouden. (lit. 15) Met figuur 44 volgt dan de golflengte op diep water:

$$L_0 = \frac{g}{2\pi} \cdot T^2 \approx 45 \text{ m} \quad (6.2.16)$$

Voor de waterstanden van de geschematiseerde getijkromme (tabel 6.2.2.1. en fig. 42) zijn uit de golfhoogten bij BG V die bij NAP -3,0 m lijn berekend. (tabel 6.2.2.2.) De index 1 in deze tabel staat voor de positie van meetpaal BG V. De index 2 staat voor de NAP -3,0 m lijn. De golfhoogte wordt beperkt door de diepte volgens:

$$H_{br} = \gamma \cdot h \quad (6.2.16a)$$

Hierin is:

$H_{br}$  = golfhoogte waarbij breken optreedt (m)

$\gamma$  = brekingsindex (hier is 0,8 aangehouden)

Aangenomen is dat indien de berekende golfhoogte groter is dan  $H_{br}$ , gerekend moet worden met  $H_{br}$ . Tot besluit zijn de golfhoogten afgerond op decimeters.

Met de golfrichting en de daaruit voortvloeiende verhoging danwel verlaging van de golfhoogte door refractie is geen rekening gehouden. Voor een eenvoudige handberekening zou dit te ver voeren, zonder dat dit tot een nauwkeuriger resultaat zou leiden.

w.s. (t.o.v. NAP)	$H_1$ (m)	$H_{br}$	$H_2$ (m)	f (%)
-0,70	0,6	1,8	0,7	50
	1,6		1,8	7
	2,6		1,8	1
+0,40	0,6	2,7	0,6	50
	1,6		1,7	7
	2,6		2,7	1
+1,10	0,6	3,3	0,6	50
	1,6		1,6	7
	2,6		2,6	1

Tabel 6.2.2.2.

- Overige parameters

Behalve de hierboven geschematiseerde parameters zijn ook de dichtheid van zand en zeewater, de  $D_{50}$  en  $D_{90}$  van zand, de valsnelheid van de  $D_{50}$  in zeewater en de ribbelhoogte vastgesteld.

De dichtheid van zeewater en zand is achtereenvolgens gesteld op  $1030 \text{ kg/m}^3$  en  $2650 \text{ kg/m}^3$ . Met vergelijking (6.2.4) volgt dan:

$$\Delta = 1,573 \quad (6.2.17)$$

Voor de  $D_{50}$  en  $D_{90}$  zijn de waarden van de bovenste laag van de boring S6-4 (fig. 39 en paragraaf 5.2.8.) genomen, dat wil zeggen  $175 \mu\text{m}$  en  $210 \mu\text{m}$ . De valsnelheid van  $D_{50}$  in zeewater met een temperatuur van  $15^\circ\text{C}$  is dan  $0,0191 \text{ m/s}$ . (lit. 16)

De zandtransporten zijn berekend voor een ribbelhoogte van 0,03 m en voor een ribbelhoogte van 0,12 m. Verondersteld is dat de werkelijke ribbelhoogte in de buurt van deze waarden ligt. Door de berekening voor twee verschillende ribbelhoogten uit te voeren, kan bovendien de invloed van de ribbelhoogte op de zandtransporten worden bepaald.

Uit het bovenstaande blijkt dat vele parameters benaderd zijn uit metingen die op enige afstand van wingebed A in het verleden zijn gedaan. Opdat de berekening van de huidige zandtransporten en de aanzanding van een te zuigen winput de werkelijkheid zo goed mogelijk benaderen, moeten de parameters zoals die nu gelden, door metingen ter plaatse worden bepaald. De uitvoering van dergelijke metingen valt echter buiten het kader van dit afstudeerwerk. Dat neemt niet weg, dat wordt aangeraden deze metingen te verrichten.

### 6.2.3. Berekende zandtransporten

Bij het berekenen van de zandtransporten per getij is rekening gehouden met de tijdsduur waarbij een combinatie van waterstand, stroomsnelheid en stroomrichting volgens de geschematiseerde getijkromme constant blijft. (fig. 42 en tabel 6.2.2.1.) Door het getijtransport met 700 (= het aantal getijden per jaar) te vermenigvuldigen is het jaartransport gevonden. Daarbij is tevens rekening gehouden met de overschrijdingsfrequentie van de golfhoogten.

De berekeningen van de zandtransporten in het ongestoorde wingebed A zijn in bijlage XI uitgevoerd. De resultaten zijn in figuur 45 gegeven. Bij beschouwing van figuur 45 valt op dat bij hogere golven de zandtransporten bij grote ribbelhoogten kleiner zijn dan bij lage ribbelhoogten.

Het totale zandtransport bestaat uit het bodem- en zwevend transport volgens vergelijking (6.2.1):

$$S_t = S_b + S_s \quad (6.2.1)$$

Het bodemtransport is berekend met (6.2.2):

$$S_b = \frac{B D v \sqrt{g}}{C} \exp\left(\frac{-0,27 \Delta D C^2}{\mu v^2 \left(1 + \frac{1}{2} \left(\xi \frac{a_b}{v}\right)^2\right)}\right) \quad (6.2.2)$$

De bodemschuifspanning onder stroom is berekend met vergelijking (6.2.10):

$$\tau_c = \rho_w \cdot g \cdot \frac{v^2}{C^2} \quad (6.2.10)$$

Met deze vergelijking kan het bodemtransport dan worden geschreven als:

$$S_b = \frac{B D v \sqrt{g}}{C} \exp\left(\frac{-0,27 \cdot \Delta \cdot D \cdot \rho_w \cdot g}{\mu \cdot \tau_c \left[1 + \frac{1}{2} \left(\xi \frac{a_b}{v}\right)^2\right]}\right) \quad (6.2.18)$$

Door de toename van  $r$  neemt de waarde van  $C$  af volgens vergelijking (6.2.3):

$$C = 18 \log \frac{12 h}{r} \quad (6.2.3)$$

Als  $C$  afneemt, dan neemt  $\tau_c$  volgens (6.2.10) toe. Ofwel, een grotere ribbelhoogte  $r$  resulteert in een toename van de bodemschuifspanning  $\tau_c$ .

De afname van de waarde van  $C$  en de toename van de bodemschuifspanning doet het bodemtransport  $S_b$  volgens vergelijking (6.2.18) toenemen.

Het bodemtransport wordt over een laag  $r$  verdeeld volgens vergelijking (6.2.9):

$$c_b = \frac{S_b}{6,34 r \sqrt{\frac{\tau_c}{\rho_w}}} \quad (6.2.9)$$

De toename van de teller (het bodemtransport) is geringer dan de toename van de noemer (de ribbelhoogte en de bodemschuifspanning). Daarom neemt de bodemconcentratie af bij grotere ribbelhoogte en bodemschuifspanning. Door de afname van de bodem-

concentratie nemen ook de concentraties boven de bodemlaag af volgens (6.2.12):

$$c(z) = c_b \cdot \left( \frac{r}{h-r} \cdot \frac{h-z}{z} \right)^{z_*} \quad (6.2.12)$$

Daarmee neemt het zwevend transport dus af. Als de afname van het zwevend transport groter is dan de toename van het bodemtransport, dan neemt het totale zandtransport dus af.

De toename van de bodemschuifspanning geeft echter een kleinere waarde voor  $z_*$  in (6.2.13):

$$z_* = \frac{w \cdot \sqrt{\rho_w}}{\kappa \cdot \sqrt{\tau_c} \cdot \left[ 1 + \frac{1}{2} \left( \xi \cdot \frac{a_b}{v} \right)^2 \right]} \quad (6.2.13)$$

De concentratievertikaal (6.2.12) wordt dan steiler. Er komt dus relatief meer materiaal in suspensie, hetgeen tot een toename in het zwevend transport leidt. Samen met een toename in het bodemtransport zou dan een toename in het totale transport resulteren.

Samengevat kan worden gesteld dat een toename van de ribbelhoogte het bodemtransport vergroot, terwijl de verandering in het zwevend transport afhankelijk is van het resultaat van twee tegengestelde effecten. Enerzijds geeft de lagere bodemconcentratie een lager zwevend transport (zie fig. 46 voor  $H = 2,6$  m) en anderzijds leidt een steilere concentratievertikaal tot een hoger zwevend transport. (zie fig. 46 voor  $H = 0,6$  m) Welk effect overheerst, is afhankelijk van de lokale omstandigheden. Uit fig. 45 blijkt, dat het omslagpunt voor wingebed A ligt tussen  $H = 0,6$  m ( $f = 50\%$ ) en  $H = 1,6$  m ( $f = 7\%$ ).

In figuur 45 valt verder op dat de ebtransporten voor golven hoger dan  $1,6$  m ( $f < 7\%$ ) niet meer toenemen. De oorzaak hiervan is de veronderstelling dat de golfhoogte tijdens eb door breking wordt beperkt tot  $1,6$  m. De zandtransporten worden hierdoor ook beperkt tot de bij  $H = 1,6$  m berekende zandtransporten.

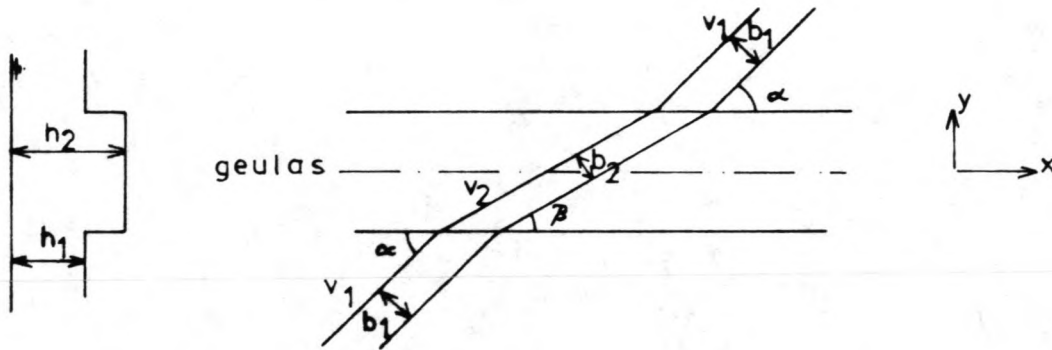
Uit de berekeningen blijkt verder dat de ebtransporten duidelijk hoger zijn dan de vloedtransporten. (fig. 45) De oorzaak hiervan is dat de ebtransporten volgens de geschematiseerde getijkromme 5 uur per

getij aanhouden tegen de vloedtransporten slechts 3 uur.

### 6.3. Stromingsbeeld in de winput

#### 6.3.1. Mogelijke modellen voor geulen

In een oneindig lange rechte geul, die onder een hoek wordt aangestroomd, zullen de stroomlijnen die de geul inlopen naar de geulas toe buigen volgens de onderstaande figuur.



Hierdoor wordt de afstand tussen de stroomlijnen in de geul kleiner. Omdat het debiet tussen de stroomlijnen constant blijft, zullen de stroomsnelheden hierdoor toenemen. Daar staat tegenover dat door de toegenomen diepte de stroomsnelheden juist afnemen.

De beide effecten werken dus tegengesteld. Bij grote hoeken tussen de stroomlijn en geulas ( $\alpha$ ) is het laatst genoemde effect overheersend. Bij kleine hoeken van inval ( $\alpha < 25-30^\circ$ ) heffen de effecten elkaar vrijwel op of neemt de snelheid iets toe, afhankelijk van de verhouding  $h_2/h_1$ .

Voor het berekenen van stroomsnelheden en -richtingen in rechte oneindig lange geulen zijn twee eenvoudige handmatige methoden met verschillende benaderingen van de Navier-Stokes vergelijking bekend. (lit. 17)

De eerste methode wordt VXCST genoemd. (lit. 18) Bij deze methode wordt ervan uitgegaan dat door de grote laterale wrijving de convectieve termen in de Navier-Stokes vergelijking overheersen en de



bodemwrijving kan worden verwaarloosd. Het gevolg is dan dat de component van de stroomsnelheid  $v$  evenwijdig aan de geulas (= x-richting in de figuur) naast en in de geul constant is, vandaar de naam VXCST.

De tweede methode wordt IXCST genoemd. (lit. 18) Hierbij wordt ervan uitgegaan dat door de grote bodemwrijving de termen voor de bodemwrijving in de Navier-Stokes vergelijking overheersen en de convectieve termen kunnen worden verwaarloosd. Dit leidt ertoe dat het verhang I van de waterspiegel evenwijdig aan de geulas (= x-richting) in en naast de geul constant is, vandaar de naam IXCST.

In literatuur 18 zijn de beide methoden vergeleken met modelproeven van het Hydraulic Research Station in Wallingford (Gr. Br.) en praktijkmetingen.

Geconcludeerd werd dat de eerste methode, VXCST, overeen kwam met de praktijkmetingen en de modelproeven voor hoeken  $\alpha > 30^\circ$ . Bij kleinere hoeken leidde deze methode tot te lage snelheden ten opzichte van de metingen. De modelproeven gaven bij kleinere hoeken juist te hoge snelheden in vergelijking tot de praktijkmetingen. Dit werd vermoedelijk veroorzaakt door de turbulentie die in het model niet op schaal was. Daarom werd voorgesteld om bij kleinere hoeken de snelheden van de modelproeven en die van de eerste methode te middelen. Dit model werd VPROMEDIO genoemd.

De tweede methode, IXCST, gaf in vergelijking tot de modelproeven en praktijkmetingen met name bij kleine hoeken  $\alpha < 30^\circ$  te hoge snelheden.

In literatuur 19 wordt gesteld, dat de convectieve termen in de Navier-Stokes vergelijking overheersen zolang:

$$\tan \gamma > \frac{g}{C^2} \quad (6.3.1)$$

Hierin is:

$\gamma$  = taludhelling onder de stroomlijn



$g$  = versnelling van de zwaartekracht =  $9,81 \text{ (m/s}^2\text{)}$

$C$  = coëfficiënt van Chézy  $\text{(m}^{\frac{1}{2}}\text{/s)}$

Met deze gegevens uit de literatuur is hierna onderzocht welke methode zich het beste leent voor het berekenen van het stroombeeld in de winput in wingebed A. Daartoe wordt eerst de waarde van het rechterlid van (6.3.1) bepaald en daarna die van het linkerlid.

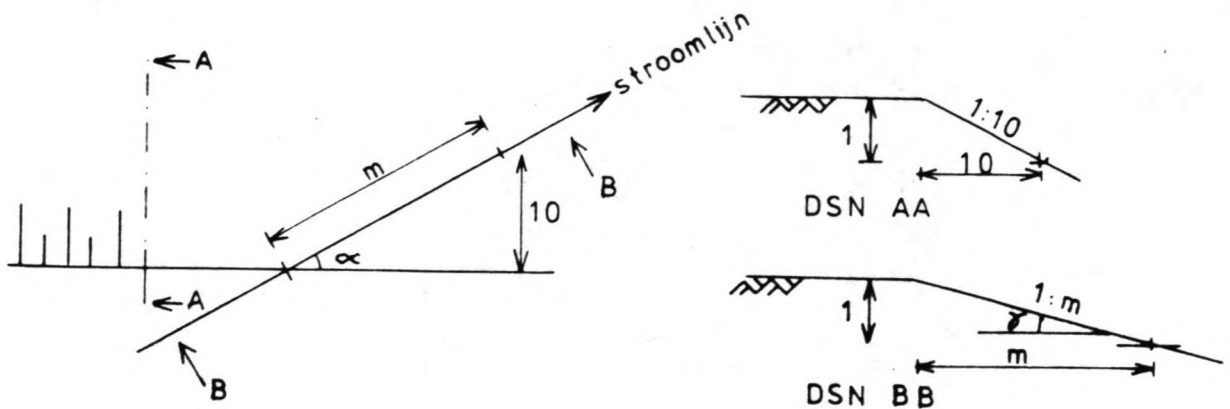
Volgens de geschematiseerde getijkromme (fig. 42, tabel 6.2.2.1.) wordt de laagste waterstand bereikt bij NAP  $-0,7 \text{ m}$ , zodat de kleinste waterdiepte  $h = 2,3 \text{ m}$ . Bij de kleinste waterdiepte en de grootste ribbelhoogte  $r = 0,12 \text{ m}$  wordt de kleinste waarde voor  $C$  bereikt. De kleinste waarde van  $C$  geeft de grootste waarde voor het rechterlid van (6.3.1). Met  $r = 0,12 \text{ m}$ ,  $h = 2,3 \text{ m}$  volgt met (6.2.3.)  $C = 42,5 \text{ m}^{\frac{1}{2}}\text{/s}$ . Samen met  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$  gaat het rechterlid van (6.3.1) dan over in:

$$\frac{g}{C^2} = 5,4 \cdot 10^{-3} \quad (6.3.2)$$

Om de taludhelling  $\gamma$  onder de stroomlijn te berekenen moeten de taludhelling van de winput en de hoek  $\alpha$  tussen de stroomlijn en de as van de winput bekend zijn.

In paragraaf 6.3.3. wordt het stromingsbeeld voor een winput in wingebed A met taludhellingen van  $1 : 10$  berekend. Voor de ligging van de as van de winput zijn twee mogelijkheden in beschouwing genomen. Enerzijds is de as van de winput evenwijdig gelegd aan de NAP  $-3,0 \text{ m}$  lijn, ofwel de as maakt een hoek van  $50^\circ$  met het noorden. Anderzijds staat de as van de winput daar loodrecht op en maakt dan een hoek van  $140^\circ$  met het noorden.

De stroomrichting is bij de hierboven genoemde waterstand van NAP  $-0,7 \text{ m}$  volgens de geschematiseerde getijkromme  $250^\circ$ . De hoek  $\alpha$  tussen de stroomlijnen en de as van de winput is dan minimaal  $20^\circ$ . Met de figuur op de volgende pagina is de waarde van het linkerlid van (6.3.1) bepaald.



$$m = \frac{10}{\sin \alpha} \quad \alpha = 20^\circ$$

$$\tan \gamma = \frac{1}{m} = \frac{\sin \alpha}{10} = \frac{\sin 20^\circ}{10} = 34 \cdot 10^{-3} \quad (6.3.3)$$

Dit is beduidend groter dan het rechterlid van (6.3.1), zodat mag worden aangenomen dat de convectieve termen in dit geval overheersen.

Volgens de geschematiseerde getijkromme is er nog één andere stroomrichting mogelijk. Deze stroomrichting treedt op tijdens vloed en maakt een hoek van  $55^\circ$  met het noorden. De hoek  $\alpha$  tussen de stroomlijnen en de as van de winput is dan minimaal  $5^\circ$ . De laagste waterstand tijdens vloed is NAP +0,4 m. Met de bodem op NAP -3,0 m en de grootste ribbelhoogte van 0,12 m wordt de kleinste waarde van C dan  $45,6 \text{ m}^{\frac{1}{2}}/\text{s}$ . Met  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$  gaat het rechterlid van (6.3.1) dan over in:

$$\frac{g}{C^2} = 4,7 \cdot 10^{-3} \quad (6.3.4)$$

Met  $\alpha = 5^\circ$  en een taludhelling van de winput van 1 : 10 geldt voor het linkerlid van (6.3.1):

$$\tan \gamma = 8,7 \cdot 10^{-3} \quad (6.3.5)$$

Deze waarde is groter dan het rechterlid volgens (6.3.4), zodat ook in dit geval mag worden aangenomen dat de convectieve termen overheersen.

Zelfs in de uiterste gevallen van kleine invalshoeken  $\alpha$  en kleine C-waarden mag dus worden aangenomen dat de convectieve termen overheersen. Het ligt dan ook voor de hand om het stromingsbeeld in de winput met het model VXCST te berekenen. Daarbij moet dan wel worden opgemerkt dat de berekende stroomsnelheden bij kleine hoeken ( $\alpha < 30^\circ$ ) te klein zullen zijn.

Behalve met de bovenbeschreven modellen IXCST en VXCST kan het stromingsbeeld in de winput ook met het 2-dimensionale computerprogramma ODYSSEE van het W.L., dat ook op de Navier-Stokes vergelijking is gebaseerd, worden berekend. Hiervan is afgezien omdat gepoogd is met eenvoudige middelen het stromingsbeeld in de winput te berekenen.

Het gekozen model VXCST kan echter niet worden toegepast, voordat een indruk van de betrouwbaarheid is verkregen. Daarom zullen de resultaten van het model VXCST met die van het computerprogramma ODYSSEE voor een bekende situatie met elkaar worden vergeleken in de volgende paragraaf 6.3.2.

Tenslotte wordt erop gewezen dat de stroomrichting en -snelheid over de vertikaal niet constant zijn. Aan de bodem zullen in de Navier-Stokes vergelijking de wrijvingstermen overheersen, terwijl aan de oppervlakte juist de convectieve termen overheersen. (lit. 19) Om een goed beeld van de stromingen in een winput of geul te krijgen zijn driedimensionale berekeningen, ondersteund met metingen in een model of in de natuur gewenst. Voor een eerste benadering van de aanzanding van de winput zou dit te voeren. Uitvoering van deze driedimensionale berekeningen en van deze metingen wordt niettemin aangeraden.

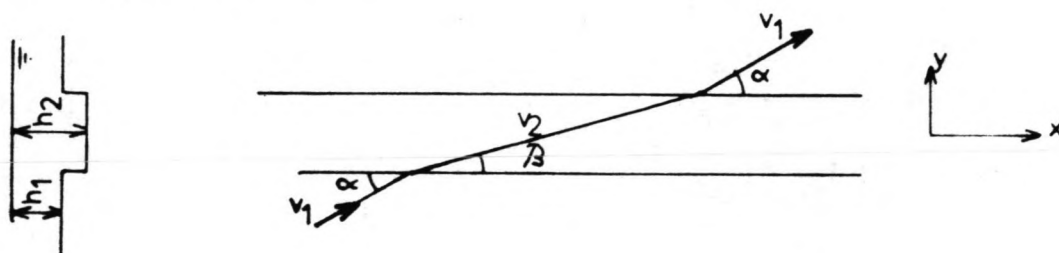
### 6.3.2. Vergelijking van het computerprogramma ODYSSEE en het model VXCST

Door het W.L. is in 1983 het stroombeeld in een 2350 m lange rechte gebaggerde proefgeul (fig. 47) bij Bahia Blanca (Argentinië)

berekend met het computerprogramma ODYSSEE. Omdat de berekeningen goed overeenkwamen met de metingen (lit. 18) wordt geconstateerd dat het ODYSSEE-programma betrouwbaar is.

Hieronder is onderzocht of van de berekening van het stroombeeld in de winput met het model VXCST betrouwbare resultaten mogen worden verwacht. Daartoe is het model VXCST toegepast in de bovengenoemde proefgeul en zijn de resultaten vergeleken met die van het betrouwbare ODYSSEE-programma.

Het model VXCST veronderstelt dat de component van de stroomsnelheid evenwijdig aan de geulas naast en in de geul gelijk zijn. (paragraaf 6.3.1.):



Of in formule:

$$v_1 \cos \alpha = v_2 \cos \beta \quad (6.3.6)$$

of:

$$v_2 = v_1 \frac{\cos \alpha}{\cos \beta} \quad (6.3.7)$$

Tevens moet worden voldaan aan de continuïteit in de y-richting:

$$v_1 h_1 \sin \alpha = v_2 h_2 \sin \beta \quad (6.3.8)$$

Deling van (6.3.8) door (6.3.6) levert:

$$h_1 \tan \alpha = h_2 \tan \beta \quad (6.3.9)$$

Of anders geschreven:

$$\beta = \arctan \left[ \frac{h_1}{h_2} \tan \alpha \right] \quad (6.3.10)$$

In figuur 47 is de sleuf getekend, tevens staat daarin aangegeven in welke overeenkomstige punten de stroomsnelheden en stroom-

richtingen van de beide berekeningen zijn vergeleken.

De punten vallen samen met enkele roosterpunten van de ODYSSEE-berekening. De taluds van de geul zijn geschematiseerd tot een trapprofiel met een treehoogte van 1,5 m. (fig. 48) De resultaten van het ODYSSEE-programma en die van het model VXCST staan in figuur 49 en tabel (6.3.2.) p.80.

Opvallend is dat er bij de ODYSSEE-berekening reeds voor de geul ( $i = 11$ ) afwijkingen in stroomrichting optreden. Anders gezegd: de veranderde bodemligging beïnvloedt het stroombeeld stroomopwaarts. De hoek tussen stroomrichting en geulas wordt kleiner. De geul trekt het water aan.

In de berekening VXCST blijven de stroomsnelheden en -richtingen bij een gelijke diepte constant. Pas bij de overgang van dieper naar ondieper water of omgekeerd treedt een abrupte verandering op in snelheid en richting.

Op het bovenstaande talud van de geul ( $i = 16, 20$ ) buigt de stroomrichting nog verder naar de geulas toe in de ODYSSEE-berekeningen.

Bij de berekening VXCST buigt de stroomrichting daarentegen van de geulas af. Dit komt door de definitie van het  $x, y$ -assenstelsel in het model. De  $x$ -as valt samen met de zijde waardoor het water de geul binnenstroomt. Bij het dieper worden van de geul buigt de stroomlijn naar de  $x$ -as toe. ( $\beta < \alpha$ ) Dit heeft tot gevolg dat de stroomlijnen die aan de korte zijde van de geul invallen, van de kanaalas afbuigen.

Verderop in het kanaal ( $i = 25$ ) verschillen de snelheden niet alleen in richting, maar ook in absolute waarde sterk. In het model VXCST past de snelheid zich omniddelijk aan de veranderde omstandigheden aan, terwijl in de berekeningen met ODYSSEE de watersnelheden vrijwel gelijk zijn aan de snelheden buiten de geul. Dit wordt veroorzaakt door de traagheid van het water, waarmee in het model VXCST geen rekening wordt gehouden.

Pas iets voorbij het midden van de geul ( $i = 40, 44$ ) zijn de

Tabel C.1.1. STROOMSNELHEDEN EN STROOMRICHTINGEN MET ODYSSEE EN VXCST

	11	16	20	25	30	35	40	44	50	54	58	
12	0,30 4,7 <sup>0</sup> 0,30 5,0 <sup>0</sup>	0,29 2,9 <sup>0</sup> 0,30 5,0 <sup>0</sup>	0,27 2,9 <sup>0</sup> 0,30 5,0 <sup>0</sup>	0,27 5,0 <sup>0</sup> 0,27 6,5 <sup>0</sup>	0,27 5,8 <sup>0</sup> 0,24 8,0 <sup>0</sup>	0,27 5,8 <sup>0</sup> 0,22 9,8 <sup>0</sup>	0,27 5,8 <sup>0</sup> 0,27 6,5 <sup>0</sup>	0,27 5,8 <sup>0</sup> 0,28 5,5 <sup>0</sup>	0,27 5,8 <sup>0</sup> 0,28 5,5 <sup>0</sup>	0,27 7,6 <sup>0</sup> 0,29 5,5 <sup>0</sup>	0,29 8,0 <sup>0</sup> 0,30 5,0 <sup>0</sup>	0,31 6,2 <sup>0</sup> 0,30 5,0 <sup>0</sup>
11	0,30 5,1 <sup>0</sup> 0,30 5,0 <sup>0</sup>	0,29 2,3 <sup>0</sup> 0,30 5,0 <sup>0</sup>	0,27 2,3 <sup>0</sup> 0,27 6,5 <sup>0</sup>	0,27 4,9 <sup>0</sup> 0,24 8,0 <sup>0</sup>	0,27 5,8 <sup>0</sup> 0,22 9,8 <sup>0</sup>	0,27 5,8 <sup>0</sup> 0,23 9,0 <sup>0</sup>	0,27 5,8 <sup>0</sup> 0,28 5,5 <sup>0</sup>	0,27 6,0 <sup>0</sup> 0,28 5,5 <sup>0</sup>	0,28 8,3 <sup>0</sup> 0,30 5,0 <sup>0</sup>	0,30 8,6 <sup>0</sup> 0,30 5,0 <sup>0</sup>	0,30 8,6 <sup>0</sup> 0,30 5,0 <sup>0</sup>	0,31 6,2 <sup>0</sup> 0,30 5,0 <sup>0</sup>
10	0,30 5,1 <sup>0</sup> 0,30 5,0 <sup>0</sup>	0,29 2,0 <sup>0</sup> 0,27 5,7 <sup>0</sup>	0,27 1,7 <sup>0</sup> 0,27 6,5 <sup>0</sup>	0,28 4,8 <sup>0</sup> 0,24 7,1 <sup>0</sup>	0,28 3,9 <sup>0</sup> 0,22 8,7 <sup>0</sup>	0,28 5,5 <sup>0</sup> 0,25 8,1 <sup>0</sup>	0,28 5,5 <sup>0</sup> 0,29 4,5 <sup>0</sup>	0,28 5,7 <sup>0</sup> 0,29 4,5 <sup>0</sup>	0,29 8,4 <sup>0</sup> 0,30 5,0 <sup>0</sup>	0,32 8,6 <sup>0</sup> 0,30 5,0 <sup>0</sup>	0,32 8,6 <sup>0</sup> 0,30 5,0 <sup>0</sup>	0,31 5,9 <sup>0</sup> 0,30 5,0 <sup>0</sup>
9	0,30 3,6 <sup>0</sup> 0,30 5,0 <sup>0</sup>	0,30 2,3 <sup>0</sup> 0,27 5,7 <sup>0</sup>	0,29 2,0 <sup>0</sup> 0,24 6,4 <sup>0</sup>	0,31 3,2 <sup>0</sup> 0,22 7,1 <sup>0</sup>	0,31 3,5 <sup>0</sup> 0,22 7,1 <sup>0</sup>	0,31 3,5 <sup>0</sup> 0,27 4,6 <sup>0</sup>	0,31 3,5 <sup>0</sup> 0,30 3,5 <sup>0</sup>	0,31 3,5 <sup>0</sup> 0,30 3,5 <sup>0</sup>	0,31 3,5 <sup>0</sup> 0,30 3,5 <sup>0</sup>	0,31 5,3 <sup>0</sup> 0,33 3,2 <sup>0</sup>	0,32 6,6 <sup>0</sup> 0,37 2,9 <sup>0</sup>	0,31 5,5 <sup>0</sup> 0,42 2,6 <sup>0</sup>
8	0,30 3,6 <sup>0</sup> 0,30 5,0 <sup>0</sup>	0,30 4,0 <sup>0</sup> 0,27 5,7 <sup>0</sup>	0,29 3,7 <sup>0</sup> 0,24 6,4 <sup>0</sup>	0,31 3,4 <sup>0</sup> 0,22 7,1 <sup>0</sup>	0,31 3,5 <sup>0</sup> 0,25 5,4 <sup>0</sup>	0,31 3,5 <sup>0</sup> 0,30 3,5 <sup>0</sup>	0,31 3,5 <sup>0</sup> 0,30 3,5 <sup>0</sup>	0,31 3,5 <sup>0</sup> 0,30 3,5 <sup>0</sup>	0,31 4,1 <sup>0</sup> 0,33 2,2 <sup>0</sup>	0,32 4,7 <sup>0</sup> 0,37 2,9 <sup>0</sup>	0,32 4,7 <sup>0</sup> 0,37 2,9 <sup>0</sup>	0,31 4,9 <sup>0</sup> 0,42 2,6 <sup>0</sup>
7	0,30 3,6 <sup>0</sup> 0,30 5,0 <sup>0</sup>	0,30 5,6 <sup>0</sup> 0,27 5,7 <sup>0</sup>	0,29 4,9 <sup>0</sup> 0,24 6,4 <sup>0</sup>	0,30 3,6 <sup>0</sup> 0,27 4,6 <sup>0</sup>	0,31 3,4 <sup>0</sup> 0,30 3,5 <sup>0</sup>	0,31 3,5 <sup>0</sup> 0,30 3,5 <sup>0</sup>	0,31 3,5 <sup>0</sup> 0,30 3,5 <sup>0</sup>	0,31 3,6 <sup>0</sup> 0,30 3,5 <sup>0</sup>	0,31 3,2 <sup>0</sup> 0,33 3,2 <sup>0</sup>	0,32 3,1 <sup>0</sup> 0,34 3,5 <sup>0</sup>	0,32 3,1 <sup>0</sup> 0,34 3,5 <sup>0</sup>	0,31 4,4 <sup>0</sup> 0,34 2,9 <sup>0</sup>
6	0,30 3,6 <sup>0</sup> 0,30 5,0 <sup>0</sup>	0,30 6,5 <sup>0</sup> 0,27 5,7 <sup>0</sup>	0,29 6,0 <sup>0</sup> 0,34 6,4 <sup>0</sup>	0,29 3,9 <sup>0</sup> 0,30 3,9 <sup>0</sup>	0,30 5,0 <sup>0</sup> 0,30 3,9 <sup>0</sup>	0,30 3,7 <sup>0</sup> 0,30 3,9 <sup>0</sup>	0,30 3,7 <sup>0</sup> 0,30 3,9 <sup>0</sup>	0,30 3,7 <sup>0</sup> 0,30 3,9 <sup>0</sup>	0,30 3,3 <sup>0</sup> 0,30 3,9 <sup>0</sup>	0,31 1,8 <sup>0</sup> 0,32 3,9 <sup>0</sup>	0,31 1,8 <sup>0</sup> 0,32 3,9 <sup>0</sup>	0,31 4,1 <sup>0</sup> 0,34 2,9 <sup>0</sup>
5	0,30 5,1 <sup>0</sup> 0,30 5,0 <sup>0</sup>	0,30 7,7 <sup>0</sup> 0,30 5,0 <sup>0</sup>	0,27 8,6 <sup>0</sup> 0,30 5,0 <sup>0</sup>	0,26 6,3 <sup>0</sup> 0,30 5,0 <sup>0</sup>	0,26 5,7 <sup>0</sup> 0,30 5,0 <sup>0</sup>	0,26 5,9 <sup>0</sup> 0,30 5,0 <sup>0</sup>	0,26 5,9 <sup>0</sup> 0,30 5,0 <sup>0</sup>	0,26 5,9 <sup>0</sup> 0,30 5,0 <sup>0</sup>	0,27 3,7 <sup>0</sup> 0,30 5,0 <sup>0</sup>	0,29 2 <sup>0</sup> 0,30 5,0 <sup>0</sup>	0,29 2 <sup>0</sup> 0,30 5,0 <sup>0</sup>	0,31 4,1 <sup>0</sup> 0,30 5,0 <sup>0</sup>
4	0,30 5,1 <sup>0</sup> 0,30 5,0 <sup>0</sup>	0,30 6,8 <sup>0</sup> 0,30 5,0 <sup>0</sup>	0,28 7,5 <sup>0</sup> 0,30 5,0 <sup>0</sup>	0,26 6,1 <sup>0</sup> 0,30 5,0 <sup>0</sup>	0,26 5,7 <sup>0</sup> 0,30 5,0 <sup>0</sup>	0,26 5,9 <sup>0</sup> 0,30 5,0 <sup>0</sup>	0,26 5,9 <sup>0</sup> 0,30 5,0 <sup>0</sup>	0,26 5,9 <sup>0</sup> 0,30 5,0 <sup>0</sup>	0,27 4,5 <sup>0</sup> 0,30 5,0 <sup>0</sup>	0,29 3,4 <sup>0</sup> 0,30 5,0 <sup>0</sup>	0,29 3,4 <sup>0</sup> 0,30 5,0 <sup>0</sup>	0,30 4,5 <sup>0</sup> 0,30 5,0 <sup>0</sup>

ODYSSEE	stroomsnelheid (m/s)	stroomrichting in graden t.o.v. geulas
VXCST	idem	idem



horizontale bodem van de geul  
door de kopse zijde van de geul  
beïnvloede zône in VXCST



stroomsnelheden en -richtingen in de geul bij beide berekeningen gelijk. Dit is te vergelijken met een situatie van een oneindig lange geul, waarin het stroombeeld niet gestoord wordt door de kopse einden van de geul.

Het ODYSSEE-programma geeft hier iets hogere snelheden (0,31 m/s tegen 0,30 m/s). Deze verschillen zijn zo gering, dat mag worden geconcludeerd, dat het model VXCST goed overeenkomt met het ODYSSEE-programma in het geval van een oneindig lange rechte geul.

Aan het einde van de geul, waar de bodem weer oploopt, ( $i = 50, 58$ ) zijn de snelheden met VXCST hoger en de hoeken tussen stroomrichting en geulas kleiner. Ook hier past het model VXCST de stroomsnelheden en -richtingen onmiddellijk aan de veranderde omstandigheden aan, terwijl in het ODYSSEE-programma de traagheid van het water de snelheid laag houdt. Daarbij komt dat bij het oplopen van het talud het tegengestelde gebeurt van wat er aan de andere kop gebeurde. Daar werd het water in de geul getrokken en hier waaiert het uit, zodat de hoek tussen stroomrichting en de kanaalas groter wordt en de snelheden kleiner.

Uit het bovenstaande kunnen de volgende conclusies ten aanzien van de betrouwbaarheid van een stroombeeld berekend met het model VXCST, worden getrokken. Het stroombeeld berekend met het model VXCST, is in een oneindig lange rechte geul betrouwbaar. Het stroombeeld aan de uiteinden van een eindig lange rechte geul berekend met het model VXCST, is daarentegen niet betrouwbaar. Het model is daar overigens ook niet voor afgeleid.

### 6.3.3. Berekende stroombeelden in de winput

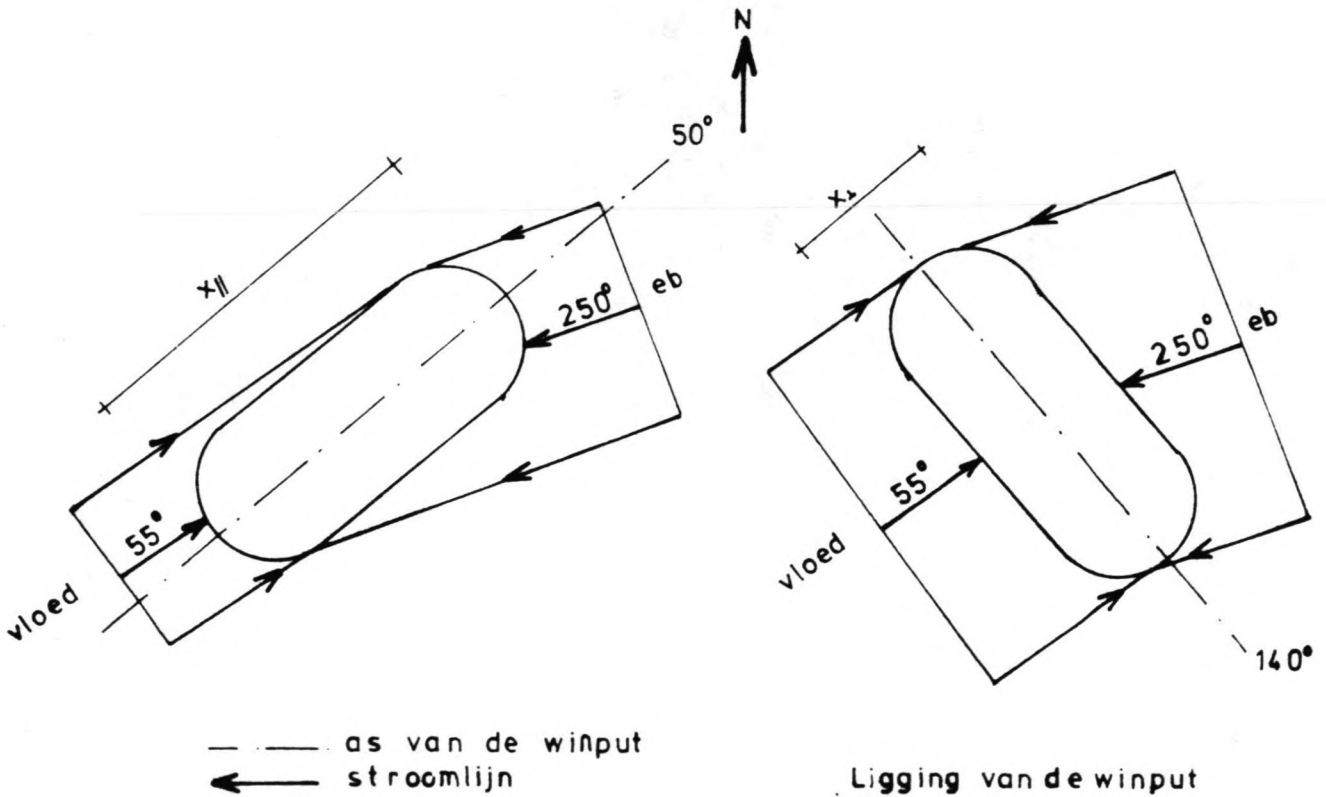
Voor de berekening van de stroomsnelheden en -richtingen in een winput is uitgegaan van hellingen van 1 : 10. Deze taludhelling ligt tussen de uiterste waarden van de hellingen, die worden verwacht van 1 : 5 tot 1 : 20. (zie bijlage IX) Bij een gewenst volume



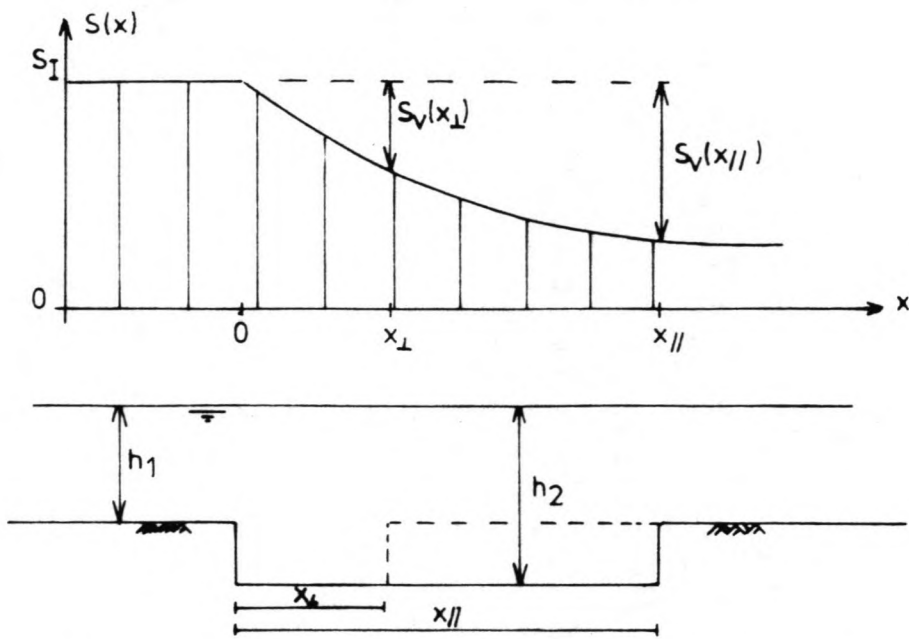
van ongeveer 1 miljoen  $m^3$  ontstaat een put zoals in figuur 50 is getekend. De zeebodem is daarbij horizontaal verondersteld.

De taluds van de winput zijn geschematiseerd tot een trapprofiel met vijf treden. Iedere trede is 2 m hoog en 20 m diep. Aan de kop van de winput ontstaat zo een amfitheater. (fig. 50)

Voor de ligging van de winput in wingebed A zijn twee mogelijkheden in beschouwing genomen. Een eerste, waarbij de as van de winput evenwijdig ligt aan de NAP -3,0 m lijn en die een hoek van  $50^\circ$  maakt met het noorden. En een tweede met de as van de winput juist loodrecht op de NAP -3,0 m lijn onder een hoek van  $140^\circ$  met het noorden. (zie onderstaande figuur)



Als de waterdiepte toeneemt, zal het zandtransport  $S(x)$  afnemen volgens de onderstaande figuur.



Het verschil tussen het inkomend zandtransport  $S_I$  en het lokale zandtransport  $S(x)$  geeft de geaccumuleerde aanzanding  $S_V(x)$  ter hoogte van  $x$ :

$$S_I - S(x) = S_V(x) \quad (6.3.11)$$

Hierin is:

$S_I$  = inkomend zandtransport ( $m^2/s$ )

$S(x)$  = zandtransport als functie van  $x$  ( $m^2/s$ )

$S_V(x)$  = geaccumuleerde aanzanding tussen  $x = 0$  en  $x = x$  ( $m^2/s$ )

De gemiddelde bodemverhoging  $dh(x)$  is dan:

$$dh(x) = \frac{S_V(x)}{x} \quad (6.3.12)$$

$dh(x)$  = gemiddelde bodemverhoging tussen  $x = 0$  en  $x = x$  ( $m/s$ )

Omdat  $S(x)$  negatief exponentieel verloopt, neemt  $S_V(x)$  volgens (6.3.11) bij toename van  $x$  langzamer toe dan  $x$  zelf. Ofwel,  $dh(x)$  is volgens (6.3.12) voor kleine waarden van  $x$  groter dan voor grote waarden van  $x$ .

De kleinste waarde van  $x$  wordt bereikt indien de stroomrichting loodrecht op de as van de winput staat en wordt hier  $x_{\perp}$  genoemd. (zie voorgaande figuur) Indien de as van de winput loodrecht op de stroomrichting staat zal de bodem dan ook het snelst omhoog komen en de winput het snelst vollopen. Dit komt vrijwel overeen met de tweede situatie van de eerste figuur.

De eerste situatie van de figuur, waarbij de stroomrichting vrijwel evenwijdig aan de as van de winput ligt, geeft juist de grootste waarde voor  $x$  en wordt  $x_{//}$  genoemd. (zie figuur) In die situatie zal de bodem het langzaamst omhoog komen en de winput het langzaamst vollopen.

Om mogelijk nadelige gevolgen van het zuigen van de winput voor de kust zoveel mogelijk te beperken, moet de winput zo snel mogelijk vollopen en dus loodrecht op de stroom worden gezogen. In dat geval zijn de posities van de punaise, het tussenstation en de persleidingen anders dan wanneer een put evenwijdig aan de stroomrichting wordt gezogen. De kosten van de uitvoering zullen dan ook anders zijn.

Om tot een optimale ligging van de te zuigen winput te kunnen komen moeten zowel de verschillen in kosten van de uitvoering als de verschillen in snelheid van vollopen van de winput voor verschillende liggingen van de winput worden berekend. De berekening van de snelheid van vollopen van de winput voor de 2 liggingen van de winput volgens de eerste figuur zullen naar verwachting vrijwel gelijk zijn aan de grootste en de kleinste snelheid van vollopen. Om dit te kunnen berekenen moeten echter eerst de stroombeelden voor de beide liggingen worden berekend.

De in de eerste figuur aangegeven stroomrichtingen voor eb en vloed zijn ontleend aan de geschematiseerde getijkromme. (fig. 42 en tabel 6.2.2.1.) Volgens paragraaf 6.2.2. zijn er 3 verschillende combinaties van waterstand, stroomsnelheid en stroomrichting van belang voor het binnenkomend zandtransport van de winput. Voor de beide hierboven genoemde liggingen van de winput moeten dus 3 stroombeelden worden berekend.

Volgens paragraaf 6.3.1. kan daarvoor het handmatige model VXCST worden gehanteerd. In paragraaf 6.3.2. werd erop gewezen, dat het model alleen betrouwbaar is in het rechte deel van een geul, voorzover de stroming daar niet door de uiteinden van die geul wordt beïnvloed.

Voor de winput met de as onder een hoek van  $50^{\circ}$  met het noorden zijn maar 2 van de 3 stroombeelden berekend. (zie tabel 6.3.3.) Uit de resultaten hiervan (fig. 51 en 52) blijkt, dat het stroombeeld in het rechte deel van de winput duidelijk wordt beïnvloed door de koppen van de winput en dus niet betrouwbaar is. (De stroomlijnen snijden elkaar.) Om een betrouwbare berekening van de aanzanding van de winput te kunnen maken is echter een betrouwbaar stroombeeld noodzakelijk. Omdat dit al voor 2 van de 3 stroombeelden niet kan worden gerealiseerd met het model VXCST, kan de situatie met de as van de winput onder een hoek van  $50^{\circ}$  met het noorden niet verder worden uitgewerkt. Het bepalen van het derde stroombeeld is voor die situatie dan ook niet zinvol.

as van de winput t.o.v.N	waterstand t.o.v.NAP	stroomsnelheid (m/s)	stroomrichting t.o.v.N	figuur
$50^{\circ}$	-0,7	0,5	$250^{\circ}$ (eb)	51
	+1,1	0,5	$55^{\circ}$ (vloed)	52
$140^{\circ}$	-0,7	0,5	$250^{\circ}$ (eb)	53
	+0,4	0,3	$55^{\circ}$ (vloed)	54
	+1,1	0,5	$55^{\circ}$ (vloed)	55

Tabel 6.3.3.

Voor de situatie van de winput met de as onder een hoek van  $140^{\circ}$  met het noorden konden wel 3 betrouwbare stroombeelden in het rechte deel van de winput worden bepaald. (zie de tabel hierboven en fig. 53, 54 en 55) In paragraaf 6.4. zal de aanzanding van de winput voor deze situatie dan ook worden berekend.

Omdat de situatie met de as van de winput onder een hoek van  $50^{\circ}$  met het noorden niet verder kan worden uitgewerkt, dan ook geen uitspraak worden gedaan over het verschil in snelheid van vollopen van de winput voor verschillende liggingen van de winput. Dit is echter wel mogelijk als de stroombeelden in de winput met het betrouwbare computerprogramma ODYSSEE worden berekend.

Daarvan is afgezien omdat gestreefd is naar een handmatige aanpak.

De geringe betrouwbaarheid van het berekende stroombeeld aan de kop van de winput, die blijkt uit het elkaar snijden van de stroomlijnen, kan als volgt worden verklaard. Voor het model VXCST moet voldaan zijn aan de voorwaarde, dat in elk snijpunt van de stroomlijn en traprede  $v_x$  en  $q_y$  constant zijn.. (paragraaf 6.3.2.) De x-as is daarbij de raaklijn aan de rand van de traprede door het snijpunt van de stroomlijn en die rand. De y-as staat daar loodrecht op.

Een invallende stroomlijn verandert bij het bovengenoemde snijpunt van richting. Op de rand van de volgende trede van het amfitheater is de raaklijn dan niet evenwijdig aan die van de vorige traprede. De raaklijn (x-as) en daarmee ook het x,y-assenstelsel zijn dus verdraaid. Bij het uittreden uit de winput van een stroomlijn is het debiet in de oorspronkelijke y-richting niet meer gelijk aan het debiet van diezelfde stroomlijn bij inval. Omdat niet wordt voldaan aan de continuïteitsvergelijking kan het berekende stroombeeld niet betrouwbaar zijn.

#### 6.4. Aanzanding van de winput

##### 6.4.1. Methode van Boeters

Indien water stroomt van een gebied met een waterdiepte  $h_1$  naar een gebied met een grotere waterdiepte  $h_2$ , dan zal door het afnemen van de stroomsnelheid een deel van het aangevoerde zand bezinken. Door Boeters is een "vereenvoudigde" analytische methode afgeleid om deze aanzanding  $S_V(x)$  te berekenen. (lit. 20) Hij veronderstelt dat het zwevend transport veel groter is dan het bodemtransport. Uit de berekening van de verhouding tussen het zwevend en het bodemtransport in bijlage XI (tabel 6.4.1.1. en 6.4.1.2.) p 87. blijkt dat deze aanname hier geoorloofd is. Daarmee wordt het totale zandtransport bij benadering gelijk aan het zwevend transport:

Tabel 6.4.1.1. BEREKENING  $\frac{S_s}{S_b}$ ,  $S_s$  en  $S_t$  voor  $r = 0,03$  m

Stapnr.						15	16	17
h (m)	H (m)	v (m/s)	A ( $10^{-3}$ )	$z_s$	$\frac{S_s}{S_b}$	$S_b (10^{-6} \text{ m}^2/\text{s})$	$S_s (10^{-6} \text{ m}^2/\text{s})$	$S_t (10^{-6} \text{ m}^2/\text{s})$
2,3	0	0,5	13,0	1,63	2,51	3,77	9,47	13,2
	0,7			0,688	18	19,5	351	371
	1,8			0,363	55,7	23,8	1330	1350
	1,8			0,363	55,7	23,8	1330	1350
3,4	0	0,3	8,8	2,87	0,875	0,0459	0,0402	0,086
	0,6			0,853	12,9	8,75	113	122
	1,7			0,418	58,1	12,9	749	762
	2,7			0,296	104	13,7	1420	1440
4,1	0	0,5	7,3	1,77	2,32	2,75	6,37	9,12
	0,6			0,852	14,2	14,3	203	217
	1,6			0,466	58,8	20,4	1200	1220
	2,6			0,332	107	21,9	2350	2370

$$S_s = \frac{S_s}{S_b} S_b$$

$$S_t = S_b + S_s$$

$$A = \frac{r}{h}$$

Tabel 6.4.1.2. BEREKENING  $\frac{S_s}{S_b}$ ,  $S_s$  en  $S_t$  voor  $r = 0,12$  m

Stapnr.						15	16	17
h (m)	H (m)	v (m/s)	A ( $10^{-3}$ )	$z_s$	$\frac{S_s}{S_b}$	$S_b (10^{-6} \text{ m}^2/\text{s})$	$S_s (10^{-6} \text{ m}^2/\text{s})$	$S_t (10^{-6} \text{ m}^2/\text{s})$
2,3	0	0,5	52,2	1,30	2,77	5,83	16,2	22,0
	0,7			0,402	13,8	27,3	376	403
	1,8			0,224	22,3	30,6	682	713
	1,8			0,224	22,3	30,6	682	713
3,4	0	0,3	35,3	2,32	1,16	0,102	0,118	0,220
	0,6			0,531	15,7	13,8	217	231
	1,7			0,280	33,8	16,7	564	581
	2,7			0,205	41,2	17,3	712	729
4,1	0	0,5	29,3	1,44	2,77	4,2	11,6	15,8
	0,6			0,543	17,2	22,1	379	401
	1,6			0,311	35,7	26,6	950	977
	2,6			0,228	45,5	27,8	1270	1290

$$S_s = \frac{S_s}{S_b} S_b$$

$$S_t = S_b + S_s$$

$$A = \frac{r}{h}$$



$$S_t \approx S_s = \int_r^h v(z) c(z) dz \quad (6.4.1)$$

Hierin is:

$S_t$  = totale zandtransport (m<sup>2</sup>/s)

$S_s$  = zwevend transport (m<sup>2</sup>/s)

$h$  = waterdiepte (m)

$r$  = ribbelhoogte (m)

$v$  = stroomsnelheid (m/s)

$c$  = zandconcentratie

De  $z$ -as is vertikaal omhooggericht.

Het vlak  $z = 0$  valt samen met de bodem.

De snelheid  $v(z)$  veronderstelt hij uniform over de waterdiepte, terwijl de concentratievertikaal  $c(z)$  een exponentieel verloop heeft:

$$v(z) = \bar{v} \quad (6.4.2)$$

$$c(z) = c_b \exp \frac{-w(z-r)}{\epsilon(z)} \quad (6.4.3)$$

Hierin is:

$\bar{v}$  = over de waterdiepte gemiddelde snelheid (m/s)

$c_b$  = zandconcentratie in de laag waar bodemtransport optreedt

$w$  = valsnelheid van een korrel zand in zee-water (0,0191 m/s)

$\epsilon$  = diffusiecoëfficiënt (m<sup>2</sup>/s)

De diffusiecoëfficiënt  $\epsilon(z)$  is eveneens constant over de hoogte verondersteld. Hier wordt daarvoor de volgende uitdrukking toegepast. (lit. 17)

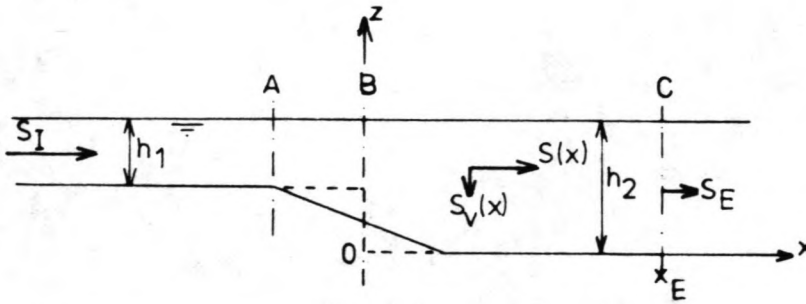
$$\epsilon(z) = \frac{0,16 \bar{v} \left[ 1 + \frac{1}{2} \left( \xi \frac{a_b}{v} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \cdot h \sqrt{g}}{C} \quad (6.4.4)$$

Hierin is:

$1 + \frac{1}{2} \left( \xi \frac{a_b}{v} \right)^2$  = term voor de invloed van de golven op het zandtransport

$C$  = coëfficiënt van Chézy (m<sup>1/2</sup>/s)

$g$  = versnelling van de zwaartekracht (= 9,81 m/s<sup>2</sup>)



In B wordt verondersteld dat zowel de stroomsnelheid  $v$  als de diffusiecoëfficiënt  $\epsilon$  zich onmiddellijk aan de veranderde waterdiepte hebben aangepast:

$$v(z) = v_2 \quad (6.4.5)$$

$$\epsilon(z) = \epsilon_2 \quad (6.4.6)$$

In de bodemconcentratie is evenwel nog geen verandering opgetreden:

$$c_{b2} = c_{b1} \quad (6.4.7)$$

De concentratievertikaal heeft zich uitgerekt en is nu:

$$c(z) = c_{b1} \exp \frac{-w(z-r)h_1}{\epsilon_1 h_2} \quad (6.4.8)$$

Vanaf B neemt het totale zandtransport  $S_t$  behorend bij de waterdiepte  $h_1$  af tot in C het evenwichtstransport  $S_E$  voor de waterdiepte  $h_2$  is bereikt. Dit verloop kan worden beschreven als het verloop van  $c(x, z)$  bekend is. Het verloop van  $c(x, z)$  volgt uit de diffusievergelijking:

$$v \frac{\partial c}{\partial x} - w \frac{\partial c}{\partial z} - \epsilon \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} = 0 \quad (6.4.9)$$

In de evenwichtssituatie - bovenstrooms van A en benedenstrooms van C - verandert de concentratie in de x-richting niet en vervalt in vergelijking (6.4.9) de term  $v \frac{\partial c}{\partial x}$ . Als de overige termen van (6.4.9) naar z worden geïntegreerd, volgt:

$$w c + \epsilon \frac{\partial c}{\partial z} = K \quad (6.4.10)$$

De term  $w_c$  stelt hierin het door het uitzakken van de zandkorrels naar beneden gerichte zandtransport voor. De andere term  $\varepsilon \frac{\delta c}{\delta z}$  geeft het zandtransport door turbulente uitwisseling weer. Dit transport is omhoog gericht als  $\frac{\delta c}{\delta z}$  negatief is. De waarde van  $K$  geeft de resultante van deze twee transporten. In de evenwichts-situatie is  $K$  gelijk aan nul. Bij aanzanding is het resulterend transport naar beneden gericht en is  $K$  positief. Bij erosie is  $K$  negatief.

Voor het oplossen van vergelijking (6.4.9) zijn een randvoorwaarde aan de bodem en aan de waterspiegel nodig, alsmede een beginvoorwaarde. Als randvoorwaarde aan de bodem ( $z = 0$ ) wordt de bodemconcentratie  $c_b$  vanaf  $B$  ( $x > 0$ ) vaak gelijk gesteld aan de bij de waterdiepte  $h_2$  behorende evenwichtsbodemconcentratie  $c_{bE}$ :

$$\text{voor } z = 0 \text{ en } x > 0 \text{ geldt: } c_b = c_{bE} \quad (6.4.11)$$

Ook wordt vaak gesteld dat er eveneens voor  $x > 0$  vanuit de laag met bodemtransport geen zand omhoog naar de laag met zwevend transport kan worden getransporteerd. Omdat de laag met bodemtransport een dikte  $r$  heeft (zie paragraaf 6.2.1.) kan deze randvoorwaarde als volgt worden geformuleerd:

$$\text{voor } z = r \text{ en } x > 0 \text{ geldt: } \varepsilon \frac{\delta c}{\delta z} = 0 \quad (6.4.12)$$

Geen van de beide genoemde randvoorwaarden zijn echter geheel juist. Na evaluatie van deze randvoorwaarden bij aanzanding heeft Boeters een randvoorwaarde opgesteld die zijns inziens de werkelijkheid misschien beter benadert. Het is in feite een combinatie van de randvoorwaarden (6.4.11) en (6.4.12). Hij stelt dat de verticale concentratiegradiënt op de grens tussen bodem- en zwevend transport voor  $x > 0$  gelijk is aan de bij de waterdiepte  $h_2$  behorende evenwichtsconcentratiegradiënt:

$$\text{voor } z = r \text{ en } x > 0 \text{ geldt: } \varepsilon \frac{\delta c}{\delta z} = \varepsilon_2 \frac{\delta c}{\delta z} \Big|_E \quad (6.4.13)$$

Uit de vergelijkingen (6.4.8), (6.4.9) en (6.4.13) volgt dan:

$$c(x, z) = c_{bI} \exp \left[ - \frac{w(z-r)h_1}{\varepsilon_1 h_2} \right] \cdot \exp(-\alpha x) \quad (6.4.14)$$

Hierin geldt voor  $\alpha$ :

$$\alpha = \frac{w^2}{v_2 \varepsilon_1 h_2} \cdot \left[ 1 - \frac{\varepsilon_2 h_1}{\varepsilon_1 h_2} \right] \quad (6.4.15)$$

Uiteraard gelden de laatste twee vergelijkingen net zo lang tot de evenwichtssituatie in C voor  $x = x_E$  is bereikt:

$$c_b(x) > c_{bE} \quad (6.4.16)$$

De evenwichtsbodemconcentratie  $c_{bE}$  is in bijlage XI met de Bijkerformule berekend. Gelijktellen van  $c_b(x)$  en  $c_{bE}$  geeft:

$$c_b(x) = c_{bE} = c_{bI} \cdot \exp(-\alpha x_E) \quad (6.4.17)$$

$$\Leftrightarrow x_E = -\frac{1}{\alpha} \ln \frac{c_{bE}}{c_{bI}} \quad (6.4.18)$$

Voorwaarde (6.4.16) kan dan ook geschreven worden als:

$$x < x_E \quad (6.4.19)$$

Uit de vergelijkingen (6.4.1), (6.4.2) en (6.4.14) volgt het verloop van het transport:

$$S(x) = \int_r^h v(z) c(z) dz = S_I \exp(-\alpha x) \quad (6.4.20)$$

De geaccumuleerde aanzanding  $S_V(x)$  in het gebied van  $x = 0$  tot  $x = x$  is het verschil tussen het inkomend transport  $S_I$  en het uitgaand transport  $S(x)$ :

$$S_V(x) = S_I - S(x) = S_I (1 - \exp(-\alpha x)) \quad (6.4.21)$$

(fig. 58A)

Ook dit geldt weer zolang aan voorwaarde (6.4.19) is voldaan.

Zoals eerder vermeld is geen rekening gehouden met de randvoorwaarde aan de waterspiegel. Deze randvoorwaarde moet zijn dat er geen zand door de waterspiegel wordt getransporteerd.

Het rechterlid in vergelijking (6.4.10) moet dan gelijk zijn aan nul. Bij gebruik van (6.4.14) in (6.4.10) voor  $z = h_2$  ontstaat evenwel:

$$w c + \varepsilon_2 \frac{\delta c}{\delta z} = \left( w - \frac{\varepsilon_2 w h_1}{\varepsilon_1 h_2} \right) c_{bI} \left[ \exp \left( -\frac{w h_1}{\varepsilon_1} \right) \right] \exp(-\alpha x) \quad (6.4.22)$$

Door de waterspiegel wordt dus een hoeveelheid zand gelijk aan het rechterlid van (6.4.22) getransporteerd. Omdat door de waterspiegel geen zand kan worden getransporteerd, zou deze hoeveelheid van de aanzanding aan de bodem moeten worden afgetrokken. Met (6.4.14) en (6.4.10) voor  $z = 0$  volgt voor het resulterend vertikaal transport aan de bodem:

$$w c + \varepsilon_2 \frac{\delta c}{\delta z} = \left( w - \frac{\varepsilon_2 w h_1}{\varepsilon_1 h_2} \right) c_{bI} \exp(-\alpha x) \quad (6.4.23)$$

De relatieve fout in het vertikaal transport aan de bodem en in de aanzanding kan worden berekend door het rechterlid van (6.4.22) te delen door dat van (6.4.23):

$$\xi = \exp - \frac{w h_1}{\varepsilon_1} \quad (6.4.24)$$

Bij zijn berekeningen ging Boeters uit van een exponentiële concentratievertikaal en een uniforme snelheidsverdeling. Dit resulteerde uiteindelijk in de aanzanding volgens vergelijking (6.4.21).

Voor het binnenkomend transport is uitgegaan van de Bijkerformule. Deze is gebaseerd op een logaritmisch snelheidsprofiel en de concentratieverdeling van Rouse. (zie paragraaf 6.2.1.) Het verloop van  $S(x)$  is bij een logaritmisch snelheidsprofiel en een Rouse concentratieverdeling niet analytisch op te lossen. Daarom is voor het verloop van  $S(x)$  de "eenvoudige" beschrijving van Boeters gehanteerd (6.4.20).

In figuur 56 zijn zowel de exponentiële als de Rouse concentratieverdeling getekend voor  $h = 4,1$  m,  $\bar{v} = 0,5$  m/s,  $H = 0,6$  m en  $r = 0,03$  M. Bij de exponentiële verdeling bevindt het meeste zand zich hoog boven de bodem en bij de Rouse verdeling juist wat lager.

In geval van de exponentiële verdeling moet het zand dus een langere weg afleggen om de bodem te bereiken dan bij de Rouse verdeling. Daarom zal bij de exponentiële verdeling de aanzanding trager verlopen dan bij de Rouse verdeling. Omdat mag worden aangenomen dat de Rouse verdeling de werkelijkheid beter benadert, zal de winput sneller aanzanden dan volgt uit de berekeningen die voor het verloop van de aanzanding (6.4.21) uitgaan van de exponentiële concentratieverdeling.

Hieronder zijn de belangrijkste vergelijkingen van het model van Boeters nog eens samengevat:

$$\text{voor } 0 < x < x_E: \quad c_b(x) = c_{bI} \exp(-\alpha x) \quad (6.4.25)$$

$$S(x) = S_I \exp(-\alpha x) \quad (6.4.20)$$

$$S_V(x) = S_I - S(x) \quad (6.4.21)$$

$$\text{voor } x \geq x_E \quad c_b(x) = c_{bE} \quad (6.4.26)$$

$$S(x) = S_E \quad (6.4.27)$$

$$S_V(x) = S_I - S_E \quad (6.4.28)$$

(fig. 58A)

Wellicht ten overvloede wordt erop gewezen dat  $S_V(x)$  de geaccumuleerde aanzanding in het gebied tussen  $x = 0$  en  $x = x$  in  $m^2/s$  weergeeft. De lokale aanzanding kan worden berekend door (6.4.21)  $S_V(x)$  naar  $x$  te differentiëren:

$$\frac{dS_V(x)}{dx} = -\alpha S_I \exp(-\alpha x) \quad (6.4.29)$$

Voor  $x > x_E$  geldt de evenwichtssituatie en is de lokale aanzanding gelijk aan nul. Het differentiëren van (6.4.28) naar  $x$  levert hetzelfde resultaat, omdat  $S_E$  en  $S_I$  constant zijn.

Bijker heeft eveneens een model ontwikkeld dat de aanzanding  $S_V(x)$  in een gebaggerde sleuf beschrijft. (lit. 17) Volgens dit meer geavanceerde model gaat  $S(x)$  asymptotisch naar het evenwichtstransport  $S_E$ . Pas voor  $x =$  oneindig wordt het evenwichtstransport bereikt. Volgens het model van Boeters wordt al voor een zekere



$x_E$  het evenwichtstransport  $S_E$  daadwerkelijk bereikt. De aanzanding  $S_I - S(x)$ , berekend met het model van Boeters, zal dan ook groter zijn dan met het model van Bijker, dat de werkelijkheid beter benadert. Omdat het model van Bijker nogal bewerkelijk is en gestreefd is naar een handmatige aanpak, is voor de aanzanding van de winput het "eenvoudige" model van Boeters gehanteerd.

#### 6.4.2. Uitbreiding van het model van Boeters

In zijn afstudeerwerk (lit. 20) heeft Boeters alleen het proces van aanzanding bij toenemende waterdiepte onderzocht. Daarnaast sprak hij de verwachting uit dat ook ingeval van erosie de randvoorwaarde (6.4.13) aan de bodem zou gelden. Als de concentratievertikaal (6.4.8) daarbij weer als beginvoorwaarde wordt gehanteerd, dan gelden de vergelijkingen (6.4.20), (6.4.21) en (6.4.25) t/m (6.4.28) ook in geval van erosie. Boeters geeft daar echter geen toepassingen van. Verderop in deze paragraaf wordt het verloop van  $S(x)$  bij toepassing van het model van Boeters wel beschreven en vergeleken met het verloop van  $S(x)$  volgens Bijker. Hieronder echter volgt eerst het hoe en waarom van de uitbreiding van het model van Boeters.

De winput is hier op dezelfde wijze geschematiseerd als voor de berekening van de stroomsnelheden werd gedaan. Het verloop van  $S(x)$  wordt langs de in de figuren 51, 52 en 53 getekende stroomlijnen door het rechte deel van de winput gevolgd. Op de rand van iedere trede wordt het uitgaande zandtransport  $S_U$  bepaald. Deze waarde is dan weer de waarde voor het binnenkomend transport  $S_I$  bij de volgende trede (fig. 57):

$$S_{U_i} = S_{I_{i+1}} \quad (6.4.30)$$

$i$  = index van de traprede

Door het buigen van de stroomlijn verschilt de waarde van  $x_{2_i}$  van trede tot trede:

$$x_{2i} = \frac{20 \text{ m}}{\sin \delta_i} \quad (6.4.31)$$

Hierin is:

20 m = breedte van de traprede

$\delta_i$  = hoek tussen de stroomlijn en de rand van de trede

Als  $x_{2i} < x_{E_i}$ , ofwel het evenwichtstransport  $S_{E_i}$  wordt op de traprede niet bereikt, dan gelden de vergelijkingen (6.4.20), (6.4.21) en (6.4.25). Op het bovenstroomse talud van de winput, waar de waterdiepte toeneemt, blijkt deze situatie zich op alle trapreden voor te doen. Het kan zelfs zo zijn, dat het uitgaande transport van de laagste trede  $S_{U_i}$  groter is dan het evenwichtstransport op de eerste trede van het benedenstroomse talud, waar de waterdiepte weer afneemt:

$$S_{U_i} > S_{E_{i+1}} \quad (6.4.32)$$

Bij gebruik van vergelijking (6.4.30) voor  $S_{U_i}$  volgt:

$$S_{I_{i+1}} > S_{E_{i+1}} \quad (6.4.33)$$

Het ingaande transport is dus hoger dan het evenwichtstransport. Op de eerste trede van het benedenstroomse talud zal dan aanzanding op moeten treden.

Door het toepassen van vergelijking (6.4.15) volgens Boeters volgt voor  $\alpha$  een negatieve waarde op het benedenstroomse talud. Met vergelijking (6.4.21) volgt dan een exponentieel afnemende aanzanding ofwel lokaal erosie, ondanks het feit dat het ingaande transport hoger is dan het evenwichtstransport. (fig. 59A) Dit is niet in overeenstemming met de werkelijkheid. (fig. 59B)

Het model van Boeters is dan ook uitgebreid, zodat de aanzanding ook bij afnemende waterdiepte kan worden beschreven. Daartoe is in de exponent van de vergelijkingen voor het verloop van de concentratie (6.4.25) en voor het verloop van het zandtransport (6.4.20) een factor  $k$  toegevoegd:

$$c_b(x) = c_{bI} \exp(-k \alpha x) \quad (6.4.34)$$

$$S(x) = S_I \exp(-k \alpha x) \quad (6.4.35)$$

Daarbij kan  $k$  de waarde van  $+1$  of  $-1$  aannemen. De waarde van  $k$  is afhankelijk van  $h_1$ ,  $h_2$ ,  $c_{bI}$  en  $c_{bE}$ :

$$k(h_1, h_2, c_{bI}, c_{bE}) \quad (6.4.36)$$

Op het bovenstroomse talud, waar de waterdiepte toeneemt en de binnenkomende bodemconcentratie hoger is dan de evenwichts- bodemconcentratie, krijgt  $k$  de waarde  $+1$ :

$$\text{voor } h_1 < h_2 \quad (6.4.37)$$

$$\text{en } c_{bI} > c_{bE} \quad (6.4.38)$$

$$\text{geldt: } k = +1 \quad (6.4.39)$$

(fig. 60A)

Op het benedenstroomse talud, waar de waterdiepte afneemt en de binnenkomende bodemconcentratie hoger is dan de evenwichts- bodemconcentratie, krijgt  $k$  de waarde  $-1$ :

$$\text{voor } h_1 > h_2 \quad (6.4.40)$$

$$\text{en } c_{bI} > c_{bE} \quad (6.4.41)$$

$$\text{geldt: } k = -1 \quad (6.4.42)$$

(fig. 60B)

Is de binnenkomende bodemconcentratie op het benedenstroomse talud weer lager dan de evenwichtsbodemconcentratie, dan krijgt  $k$  weer de waarde  $+1$ :

$$\text{voor } h_1 > h_2 \quad (6.4.43)$$

$$\text{en } c_{bI} < c_{bE} \quad (6.4.44)$$

$$\text{geldt: } k = +1 \quad (6.4.45)$$

De eerst- en de laatstgenoemde situaties konden met het oorspronkelijke model van Boeters worden beschreven. De waarde van  $k$  is in die gevallen dan ook gelijk aan  $+1$ . De uitbreiding heeft dan in feite alleen betrekking op de tweede situatie. De waarde van  $k$  is in dat geval  $-1$ .

In de exponent van vergelijking (6.4.14) is  $\alpha$  ook met  $k = -1$  vermenigvuldigd en ontstaat voor het verloop van de concentratie:

$$c(x, z) = c_{bI} \exp \left[ - \frac{w(z-r) h_1}{1 h_2} \right] \cdot \exp(-k \alpha x) \quad (6.4.46)$$

Met gebruik van de uitdrukking (6.4.15) voor  $\alpha$  en van (6.4.46) kan worden aangetoond dat de uitbreiding ook aan de diffusie-vergelijking (6.4.9) voldoet.

Bij beschouwing van figuur 60C valt op dat  $S(x)$  aanvankelijk weinig toeneemt en naarmate  $S(x)$  het evenwichtstransport  $S_E$  dichternadert de verandering in  $S(x)$  groter is. Bij andere modellen die de werkelijkheid beter benaderen, zoals dat van Bijker bijvoorbeeld, is juist het omgekeerde het geval. (fig. 61A en C) Hieronder volgt een bespreking van de gevolgen voor de resultaten van de berekening van de aanzanding van de winput met het model van Boeters.

De erosie  $S_V(x)$  in de winput wordt aan het eind van de traprede  $x_2$  berekend. Indien de evenwichtssituatie nog niet is bereikt, ofwel  $x_2 < x_E$ , dan is de berekende erosie in het model van Boeters te laag. Daarmee zou de snelheid van vollopen van de winput dus kleiner dan berekend moeten zijn.

Op de laatste trede echter wordt de berekening doorgezet tot de evenwichtssituatie weer is bereikt. ( $x = x_E$ ) Het verschil tussen het binnenkomend transport en het evenwichtstransport is in het model Boeters weer groter dan bij het model van Bijker. (fig. 61 B en D) De met Boeters berekende erosie is dan juist groter dan dat met Bijker het geval is. Daarmee zou de snelheid van vollopen van de winput dus juist groter moeten zijn dan uit de berekeningen met Boeters volgt.

Het binnenkomend transport op de eerste trede van het benedenstroomse talud, waar erosie optreedt, en het evenwichtstransport op de laatste trede zijn echter bekend. Daarmee ligt ook de erosie, die gelijk is aan het verschil tussen deze transporten, vast. De snelheid waarmee de winput volloopt, is dan ook onafhankelijk van

het verloop van  $S(x)$ . (fig. 61B en D)

Dat neemt echter niet weg, dat met het model van Boeters de verdeling van de erosie over het benedenstroomse talud niet goed wordt beschreven. De berekende erosie in de winput is aanvaardbaar te laag en op de laatste trede juist te hoog. Daarom is getracht een verloop van  $c_b(x)$  en daarmee van  $S(x)$  te construeren dat meer in overeenstemming is met de werkelijkheid. Dit verloop bleek echter niet aan de diffusievergelijking (6.4.9) te voldoen, zodat van de toepassing is afgezien. Bij de berekening van de erosie met het model van Boeters moet er dan ook altijd op worden gewezen dat het verloop van deze erosie niet juist is.

#### 6.4.3. Berekende aanzanding van de winput

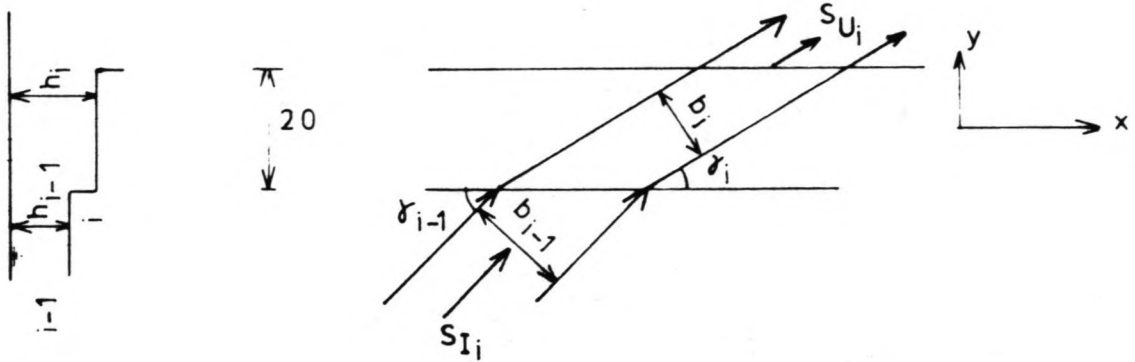
Voor de berekening van de aanzanding van de winput is uitgegaan van de in paragraaf 6.3.3. geschematiseerde winput (fig. 50) met een hoek van  $140^\circ$  tussen de as van de winput en het noorden.

Om de aanzanding per trede van de winput te berekenen zijn eerst de evenwichtsbodemconcentraties  $c_{be}$  per trede berekend met de Bijkerformule. (zie paragraaf 6.2.1.) Deze evenwichtsbodemconcentraties zijn voor de drie in paragraaf 6.3.3. berekende stromingsbeelden bepaald. (fig. 51, 52 en 53)

Behalve de stroomsnelheid is ook de golfhoogte per trede nodig voor de berekening van de evenwichtsbodemconcentratie. Daarom zijn dezelfde vier golfhoogten van golfmeetpaal BG V als in paragraaf 6.2.2. ( $H = 0 / 0,6 / 1,6 / 2,6$  m) met behulp van figuur 44 omgezet naar een golfhoogte per trede.

Voor het binnenkomend transport is uitgegaan van de transporten in het ongestoorde gebied, zoals berekend in paragraaf 6.2.3. Vervolgens is met het uitgebreide model van Boeters de geaccumuleerde aanzanding  $S_{V_2}$  per traptrede berekend. (bijlage XII) Uiteraard weer voor elk van de drie combinaties van waterstand, stroomsnelheid en stroomrichting. (tabel 6.2.2.1.)

De aanzanding per traprede is berekend door de gemiddelde verhoging  $dh$  per traprede te berekenen. Met behulp van onderstaande figuur is de formule voor  $dh$  afgeleid.



Tussen twee stroomlijnen komt per tijdseenheid een hoeveelheid zand  $S_{I_i} \cdot b_{i-1}$  over de rand van de trede  $i$  binnen, terwijl over de andere rand  $S_{U_i} \cdot b_i$  verdwijnt. Per tijdseenheid zakt er dus een hoeveelheid  $S_{I_i} \cdot b_{i-1} - S_{U_i} \cdot b_i$  uit over de oppervlakte tussen de twee stroomlijnen van  $\frac{20}{\sin \gamma_i} \cdot b_i$ .

De gemiddelde verhoging van de trede is dan:

$$dh_i = \frac{S_{I_i} \cdot b_{i-1} - S_{U_i} \cdot b_i}{\frac{20}{\sin \gamma_i} \cdot b_i} \quad (6.4.47)$$

Tussen  $b_{i-1}$  en  $b_i$  bestaat op grond van goniometrische verhoudingen de volgende relatie:

$$b_{i-1} = b_i \cdot \frac{\sin \gamma_{i-1}}{\sin \gamma_i} \quad (6.4.48)$$

Bij gebruik van (6.4.48) in (6.4.47) ontstaat:

$$dh_i = \frac{1}{20} \left[ S_{I_i} \cdot \sin \gamma_{i-1} - S_{U_i} \cdot \sin \gamma_i \right] \quad (6.4.49)$$

Vergelijking (6.4.49) geeft in feite de continuïteit in het zandtransport in de  $y$ -richting weer. Daarin zijn:

$S_I$  = binnenkomend transport ( $m^2/s$ )

$S_U$  = uitgaand transport ( $m^2/s$ )



$dh$  = gemiddelde verhoging van de traprede (m/s)

20 = lengte van de traprede (20 m)

De gemiddelde jaarlijkse verhoging van de traprede is gevonden door rekening te houden met de tijdsduur waarbij een combinatie van waterstand, stroomsnelheid en -richting constant blijft per getij, het aantal getijden per jaar (= 700) en de overschrijdingsfrequenties van de golfhoogten. Deze verhoging is weer door 52 gedeeld om de gemiddelde wekelijkse verhoging per trede te vinden.

De aanzanding/erosie ten gevolge van de drie combinaties van waterstand, stroomsnelheid en stroomrichting zijn voor iedere trede gesommeerd. Daarbij moet erop worden gewezen, dat het benedenstroomse talud van de winput bij ebstroom juist het bovenstroomse talud bij vloedstroom is en omgekeerd.

Het talud van de winput is geschematiseerd tot een trapjesprofiel waarbij de middens van de treden samenvielen met het talud. Bij het grafisch weergeven van de aanzanding is aangemomen dat het talud juist door het midden van de verhoogde trede loopt en de verbindingslijn tussen deze middens het talud weergeeft. De in bijlage XII uitgevoerde berekening van de aanzanding resulteert in een bodemligging na één week volgens de figuren 62 en 63 voor de ribbelhoogten  $r = 0,03$  en  $0,12$  m.

Opgemerkt moet worden dat volgens het model van Boeters het binnenkomend transport  $S_I$  op de eerste trede van de winput gelijk is aan het uitgaand transport  $S_U$  op de laatste trede, zodat op grond van de continuïteit de winput nooit vol zal lopen. De som van de aanzanding en erosie van alle treden samen is dan ook nul:

$$\sum_{i=1}^n dh_i = 0 \quad (6.4.50)$$

$n$  = aantal treden

De oppervlakte van de dwarsdoorsnede van de winput blijft in de tijd constant. Uit de resultaten van de berekeningen, weergegeven

in de figuren 62 en 63, blijkt dat al in één week de vorm van de winput verandert. De put verplaatst zich met de richting van de ebstroom mee. De helling van het voor de ebstroom bovenstroomse talud verandert daarbij nauwelijks. Het benedenstroomse talud wordt flauwer en het diepste punt van de winput komt omhoog.

Als dit proces zich in de tijd voortzet, dan kan worden aangenomen dat de put steeds ondieper wordt en uiteindelijk de oorspronkelijke bodemligging zal naderen. Bovendien zal de put zich met de ebstroom van de kust van Goeree af verplaatsen. Er behoeft dan ook niet te worden gevreesd voor mogelijk nadelige gevolgen voor die kust.

Om echter een goed beeld van de aanzanding van de winput in de tijd te krijgen, zouden zowel de berekening van het stroombeeld als die van de aanzanding voor de nieuwe bodemligging moeten worden herhaald. Daarvan is afgezien, omdat dit te veel rekentijd zou vergen. Desondanks is de aanzanding na meerdere weken benaderd. De wijze waarop en de resultaten worden hieronder besproken.

De berekende wekelijkse aanzanding of erosie per trede is verondersteld in de daarop volgende weken gelijk te blijven. Na twee weken is de verhoging of verlaging van een trede dus tweemaal zo groot als na één week. Als een trede  $i$  op het voor de ebstroom bovenstroomse talud echter na enkele weken meer dan twee meter is aangezand, dan heeft die trede in feite dezelfde hoogte als de trede  $i-1$  ervoor in de oorspronkelijke situatie. In dat geval is het aannemelijk om vanaf die hoogte niet langer met een wekelijkse aanzanding  $dh_i$  te rekenen, maar met  $dh_{i-1}$ . Hetzelfde geldt voor de erosie op het voor de ebstroom benedenstroomse talud. In formule weergegeven geeft dit:

$$\left| dh_i \cdot t \right| > 2 \text{ m} \Rightarrow dh_i = dh_{i-1} \quad (6.4.51)$$

Hierin is:

$$\begin{aligned} dh_i &= \text{gemiddelde verhoging van trede } i \quad (\text{m/wk}) \\ t &= \text{tijd} \quad (\text{wk}) \end{aligned}$$

Deze situatie doet zich voor bij de aanzanding van de laagste trede van de winput (NAP -13,0 m) na 3-4 weken. De eerstvolgende trede (NAP -11,0 m), voor de ebstroom stroomafwaarts, is in diezelfde tijd slechts weinig geërodeerd. Op dat moment is de onderste trede van de winput dus eigenlijk 2 treden lang en ligt op NAP -11,0 m.

Het aangevoerde zand  $S_{I_i}$  kan nu dus over een 2 maal grotere afstand uitzakken. Daarmee veranderen het uitgaande transport  $S_{U_i}$  en de gemiddelde verhoging  $dh_i$  van de trede. Volgens vergelijking (6.4.30) geeft een verandering in  $S_{U_i}$  een gelijke verandering in het binnenkomend transport  $S_{I_{i+1}}$ . Dit werkt met vergelijking (6.4.49) ook weer door in de erosie  $dh_{i+1}$  van de volgende trede. Het omhoog komen en lager worden van de laagste trede heeft uiteindelijk invloed op de erosie van het gehele voor de ebstroom benedenstroomse talud. Bij de benadering van de bodemligging na enkele weken is hiermee rekening gehouden.

Uiteraard komt er daarna een moment dat het diepste deel van de winput weer 2 en 4 meter hoger en 3 en 4 treden lang is. Met deze situaties is op dezelfde wijze rekening gehouden. De resultaten van de benadering van het verloop van de aanzanding in de tijd staan voor  $r = 0,03$  m en  $r = 0,12$  m eveneens in de figuren 62 en 63. Uit die figuren blijkt dat min of meer aan de continuïteit is voldaan. De diepte van de put neemt af en de trede van het diepste deel van de put wordt langer, de oppervlakte van de dwarsdoorsnede van de winput blijft gelijk. Een goede controle op de continuïteit is echter niet mogelijk, omdat de erosie buiten de oorspronkelijke winput niet is bepaald. Hiervoor zou namelijk een nieuwe berekening van de aanzanding bij de bodemligging na enkele weken noodzakelijk zijn. Van zo'n berekening is afgezien, omdat niet verwacht werd dat daarmee het inzicht in het proces van aanzanding zou worden vergroot.

Uit de figuren 62 en 63 blijkt verder dat het diepste punt van de winput aanvankelijk snel en verder in de tijd steeds langzamer omhoog komt. Dit duidt op een negatief exponentieel verloop naar

de oorspronkelijke bodemligging. Het diepste punt van de winput is voor  $r = 0,03$  en  $0,12$  m tegen de tijd uitgezet in figuur 64. Door deze punten zijn met behulp van de kleinste kwadraten methode de beste exponentiële krommen getrokken.

Voor  $r = 0,03$  m werd gevonden:

$$h = \text{NAP} - 3,00 \text{ m} - 9,93 \exp - 0,06 t \quad (6.4.52)$$

Voor  $r = 0,12$  m werd gevonden:

$$h = \text{NAP} - 3,00 \text{ m} - 9,90 \exp - 0,04 t \quad (6.4.53)$$

Hierin is:

$h$  = bodemligging t.o.v. NAP (m)

$t$  = tijd (wk)

NAP - 3,0 m komt overeen met de oorspronkelijke bodemligging.

Indien  $h = \text{NAP} - 3,2$  m, dan mag worden aangenomen dat de oorspronkelijke situatie zo goed als hersteld is. Het verschil met de oorspronkelijke bodemligging is dan slechts 0,2 m, hetgeen binnen de nauwkeurigheid van de lodingen valt. Op grond van de continuïteit, de oppervlakte van de dwarsdoorsnede van de winput blijft gelijk, is de lengte van de winput dan circa 5 km. De situatie, waarbij  $h = \text{NAP} - 3,2$  m, wordt voor  $r = 0,03$  m bereikt bij  $t = 65$  wk, en voor  $r = 0,12$  m bij  $t = 98$  wk.

#### 6.4.4. Bespreking resultaten

Bij beschouwing van de figuren 62 en 63 valt op dat de put aanzandt vanaf de voor de ebstroom bovenstroomse zijde. Nu geven de figuren de resultaten weer van de aanzanding en erosie van de afzonderlijke treden door eb- en vloedstroom tesamen. Voor zowel de eb- als de vloedstroom geldt dat er aanzanding optreedt op het bovenstroomse talud en erosie op het benedenstroomse talud. Omdat het voor de ebstroombovenstroomse talud juist het benedenstroomse talud voor de vloedstroom is, werken de aanzanding door eb en de

erosie door vloed elkaar hier tegen. Op het voor de ebstroom benedenstroomse talud weken de erosie door eb en de aanzanding door vloed elkaar tegen. Uit de figuren blijkt dat de aanzanding door eb op het voor de ebstroom bovenstroomse talud groter is dan de erosie door vloed. Op het andere talud is de erosie door eb groter dan de aanzanding door vloed. De ebstroom domineert het proces van de aanzanding van de winput klaarblijkelijk. Dit is ook te verwachten, als bedacht wordt dat de binnenkomende ebtransporten groter zijn dan de vloedtransporten, zoals al werd geonstateerd in paragraaf 6.2.3..

In de figuren 62 en 63 is voor de ligging van de winput na één week op het voor de ebstroom benedenstroomse talud een duidelijk omslagpunt te herkennen waar de aanzanding in erosie overgaat. ( $\approx$  NAP - 11,0 m) Ook dit is het resultaat van eb- en vloedtransporten samen, waarbij de ebtransporten domineren.

Uit de berekeningen in bijlage XII blijkt dat de golfhoogte de ligging van het omslagpunt bepaalt. Zijn er geen golven, dan ligt het omslagpunt veel dieper, namelijk tussen NAP - 5,0 m en NAP - 3,0 m. (fig. 65) Bij golven van 2,6 m ligt het omslagpunt veel dieper, namelijk tussen NAP - 13,0 m en NAP - 11,0 m. Omdat de bijdragen van de transporten bij hogere golven in het totale binnenkomende transport veel groter zijn dan die zonder golven, ligt het omslagpunt bij zowel de eb- als de vloedstroom tussen NAP - 13,0 m en NAP - 11,0 m van het benedenstroomse talud.

De aanzanding door eb op het voor de ebstroom bovenstroomse talud - waar het omslagpunt voor de vloedstroom ligt - is zoveel groter dan de erosie door vloed, dat het omslagpunt voor de vloedstroom omhoog schuift tot tussen de bovenste treden op NAP - 3,0 m en NAP - 5,0 m. Op het andere talud weegt de aanzanding door vloed niet op tegen de erosie door eb en blijft het omslagpunt voor de ebstroom tussen de treden van NAP - 13,0 m en NAP - 11,0 m.

Hierboven werd opgemerkt dat de golfhoogte de ligging van het omslagpunt bepaalt, Dit wordt hieronder verklaard. Bij toenemende waterdiepte neemt de snelheid  $v$  af, de coëfficiënt van Chézy toe en



de schuifspanning aan de bodem onder stroom  $\tau_c$  af. (zie tabel 6.4.4.1.) De waarde van  $W$ , die de invloed van de golven op de schuifspanning aangeeft neemt toe. Bij beschouwing van vergelijking (6.4.54) blijkt dat in de transportparameter  $\frac{BDv\sqrt{g}}{C}$  de golfinvloed  $W$  niet voorkomt.

$$S_b = \frac{BDv\sqrt{g}}{C} \exp - \frac{0,27 \Delta D \rho_w g}{\mu \tau_c W} \quad (6.4.54)$$

Bij toenemende waterdiepte zal deze transportparameter door de afname in  $v$  en de toename van  $C$  afnemen, onafhankelijk van het feit of er wel of geen golven zijn. De overige variabelen  $B$ ,  $D$  en  $g$  veranderen namelijk niet met de waterdiepte.

In de bewegingsparameter  $\exp \frac{-0,27 \Delta D \rho_w g}{\mu \tau_c W}$  komt de golfinvloed  $W$  wel voor. De variabelen  $\Delta$ ,  $D$ ,  $\rho_w$  en  $g$  veranderen niet met de waterdiepte of golfhoogte, terwijl  $\mu$  en  $\tau_c$  onafhankelijk van het feit of er wel of geen golven zijn, afnemen bij toename van de waterdiepte. De resulterende schuifspanning door de combinatie van stroom en golven  $\tau_c W$  neemt bij hogere golven en toenemende waterdiepte langzamer af dan bij lagere of geen golven. Dit komt omdat de waarde van  $W$  bij hogere golven sneller toeneemt dan bij lagere golven met toenemende waterdiepte. Zijn er geen golven, dan is de waarde van  $W$  voor alle waterdiepten gelijk aan 1. (tabel 6.4.4.1.) p.106

De hierboven opgemerkte toename van  $W$  overtreft de afname van  $\tau_c$  en  $\mu$  tesamen overigens niet. Het produkt van  $\mu$ ,  $\tau_c$  en  $W$  neemt dus af bij toenemende waterdiepte. Bij hogere golven is deze afname evenwel geringer dan bij lagere golven. Omdat de overige variabelen in de bewegingsparameter niet met de waterdiepte veranderen, zal deze bij toenemende waterdiepte voor hoge golven langzamer veranderen dan bij lage of geen golven.

Omdat de bewegings- en transportparameter met toenemende waterdiepte afnemen, neemt het bodemtransport  $S_b$ , dat het produkt van beide parameters is, ook af met toenemende waterdiepte. Bij hoge golven is de afname in de bewegingsparameter echter geringer dan



Tabel 6.4.4.1.  $v$ ,  $\mu$ ,  $C$ ,  $\zeta_c$ ,  $S_{bE}$  en  $c_{bE}$  als functie van de waterdiepte en de golfhoogte voor  $r = 0,03$  m

$h$ (m)	$H$ (m)	$v$ (m/s)	$\mu$	$C$ ( $m^{1/2}/s$ )	$\zeta_c$ ( $N/m^2$ )	$W$	$S_{bE}$ ( $10^{-6} m^2/s$ )	$c_{bE}$ ( $10^{-3}$ )
4,1	0	0,5	0,463	57,9	0,754	1	2,75	0,534
	0,6					4,29	2,78	
	1,6					14,4	3,96	
	2,6					28,3	4,26	
6,1	0	0,34	0,478	61,0	0,314	1	0,103	0,031
	0,6					6,07	2,02	
	1,6					20,7	3,61	
	2,6					38,8	4,04	
8,1	0	0,26	0,488	63,2	0,171	1	0,014	0,0006
	0,6					7,56	1,40	
	1,6					25,5	3,24	
	2,6					47,5	3,81	
10,1	0	0,21	0,495	64,9	0,106	1	-	-
	0,6					8,52	0,855	
	1,6					28,4	2,77	
	2,6					55,0	3,54	
12,1	0	0,18	0,501	66,3	0,0745	1	-	-
	0,6					8,78	0,466	
	1,6					28,4	2,26	
	2,6					54,2	3,17	
14,1	0	0,16	0,506	6,75	0,0568	1	-	-
	0,6					8,49	0,212	
	1,6					26,6	1,72	
	2,6					49,8	2,72	

bij lage of geen golven. De afname in bodemtransport bij hoge golven en toenemende waterdiepte is dan ook minder dan bij lage of geen golven.

De schuifspanning onder stroom  $\tau_c$  neemt met en zonder golven in gelijke mate af bij toenemende waterdiepte, terwijl  $\rho_w$  en  $r$  daarbij constant blijven. De bodemconcentratie  $c_b$  zal volgens vergelijking (6.4.55) bij toenemende waterdiepte voor hoge golven door de langzamere afname in bodemtransport dan ook langzamer zijn dan bij lagere of geen golven.

$$c_b = \frac{S_b}{6,34 r \sqrt{\frac{\tau_c}{\rho_w}}} \quad (6.4.55)$$

Met andere woorden: de evenwichtsbodemconcentraties volgens vergelijking (6.4.55) bij hoge golven liggen op de opeenvolgende treden dichter bij elkaar dan bij lagere of geen golven.

Nu is de inkomende bodemconcentratie op de eerste trede van de winput  $c_{bI_1}$  gelijk aan de evenwichtsbodemconcentratie in het ongestoorde wingebed  $c_{bE_0}$ . De afstand  $x_{E_1}$ , waarvoor de evenwichtssituatie op de eerste trede zou worden bereikt, wordt met vergelijking (6.4.56) berekend:

$$x_{E_1} = -\frac{1}{\alpha} \ln \frac{c_{bE_1}}{c_{bI_1}} \quad (6.4.56)$$

Omdat  $c_{bE_1}$  en  $c_{bI_1}$ , die gelijk is aan  $c_{bE_0}$ , voor hoge golven dichter bij elkaar liggen, is het quotiënt van  $c_{bE_1}$  en  $c_{bI_1}$  kleiner dan bij lagere of geen golven. De natuurlijke logaritme is bij hoge golven dan ook minder negatief en de afstand  $x_{E_1}$  wordt kleiner dan bij lagere of geen golven.

Bij toenemende golfhoogte echter neemt  $\alpha$  op de eerste trede af. (tabel 6.4.4.2.) Bij hoge golven zou  $x_E$ , die omgekeerd evenredig is met  $\alpha$ , dus groter moeten zijn dan bij lagere of geen golven. Uit de berekeningen blijkt echter juist het omgekeerde het geval. (tabel 6.4.4.2.) De geringere verschillen in de binnenkomende

bodemconcentratie  $c_{bI_1}$  en de evenwichtsbodemconcentratie  $c_{bE_1}$  bij hoge golven zijn blijkbaar van meer belang dan de kleinere  $\alpha$ , zodat  $x_{E_1}$  kleiner is dan bij lage of geen golven.

H (m)	0	0,6	1,6	2,6
$\alpha$ ( $10^{-3}$ )	14,4	4,56	2,42	1,87
$c_{bI}$ ( $10^{-3}$ )	0,534	2,78	3,96	4,26
$c_{bE}$ ( $10^{-3}$ )	0,031	2,02	3,61	4,04
$x_E$ (m)	198	70	38,2	28,4

$$h = 6,1 \text{ m} \quad r = 0,03 \text{ m} \quad v = 0,34 \text{ m/s}$$

Tabel 6.4.4.2.

De uitkomende bodemconcentratie van de eerste trede  $c_{bU_1}$  wordt berekend met vergelijking (6.4.57):

$$c_{bU_1} = c_{bU_1} \exp -\alpha x_{2,1} \quad (6.4.57)$$

$x_{2,1}$  = lengte van de eerste traptrede, gemeten onder de stroomlijn

De afstand  $x_{2,1}$  is voor alle golfhoogten gelijk. Bij hoge golven is  $x_{E_1}$  kleiner dan bij lagere of geen golven. Bij hoge golven ligt  $x_{2,1}$  dan ook dichterbij  $x_{E_1}$ . De waarde van  $c_{bU_1}$ , die gelijk is aan de inkomende bodemconcentratie  $c_{bI_2}$  op de tweede trede, ligt bij hoge golven dan ook dichterbij de evenwichtsbodemconcentratie op de eerste trede  $c_{bE_1}$  en dus ook bij die op de tweede trede  $c_{bE_2}$  dan bij lagere of geen golven. Omdat  $c_{bE_2}$  en  $c_{bI_2}$  op de tweede trede bij hoge golven dichterbij elkaar liggen, volgt weer dat  $x_{E_2}$  kleiner is dan bij lagere golven. Om dezelfde redenen geldt dit ook voor de daaropvolgende treden. Tabel 6.4.4.3., die ontleend is aan de resultaten van de berekeningen van bijlage XII, bevestigt dit.

De evenwichtssituatie wordt bij hoge golven dus eerder bereikt dan bij lagere of geen golven. Dit geldt ook voor het benedenstroomse talud. De aanzanding gaat hier na het bereiken van de evenwichts-

situatie bij het zogenoemde omslagpunt over in erosie. Dit omslagpunt wordt bij hoge golven dus eerder bereikt en ligt daarom dieper in de winput dan bij lagere of geen golven.

$h$ (m) \ $H$ (m)	0	0,6	1,6	2,6
6,1	198	70	38,2	28,4
8,1	401	134	61,5	40,6
10,1	710	199	92,3	61,0
12,1	740	287	129	76,9
14,1	791	384	178	109

$x_E$  (m) op het bovenstroomse talud van de winput  
als functie van de golfhoogte en de waterdiepte  
voor  $r = 0,03$  m

Tabel 6.4.4.3.

De invloed van de taludhelling op de ligging van het omslagpunt kan als volgt worden geschat. Bij afwezigheid van golven en een taludhelling van 1 : 10 ligt het omslagpunt op NAP - 3,0 m. Bij een flauwer talud zijn de trap treden van het geschematiseerde dwarsprofiel veel langer en kan er meer zand naar de bodem uitzakken. Stel nu dat hierdoor op de rand van iedere trede het evenwichts-transport wordt bereikt, dus ook op de laagste trede op NAP - 13,0 m. Op de volgende trede (NAP - 11,0 m) zal dan erosie optreden, omdat het inkomend transport, dat gelijk is aan het evenwichts-transport op NAP - 13,0 m, kleiner is dan het evenwichtstransport op NAP - 11,0 m. Het omslagpunt ligt dan op NAP - 11,0 m en dus lager dan bij het steilere talud waarbij het op NAP - 3,0 m lag.

Daarom mag worden aangenomen dat het omslagpunt bij flauwe taluds dieper ligt dan bij steile taluds. Volgens de figuren 62 en 63 ligt het omslagpunt bij een taludhelling van 1 : 10 al erg diep op NAP - 11,0 m. Bij flauwere taluds zal dit punt niet dieper kunnen komen te liggen. Alleen bij steilere taluds kan het wellicht omhoog verplaatsen.

Op geen van de hierboven genoemde effecten had de ribbelhoogte  $r$

enige invloed. De ribbelhoogte heeft wel invloed op de hersteltijd. Voor  $r = 0,03$  m is deze 65 weken en voor  $r = 0,12$  m is deze 98 weken. (zie paragraaf 6.4.4.) Nu zijn de transporten die de winput binnenkomen, voor  $r = 0,12$  m kleiner dan die voor  $r = 0,03$  m. (zie paragraaf 6.2.3.) Hieruit kan dan ook worden geconcludeerd, dat de hersteltijd bij grote binnenkomende transporten kleiner is dan bij kleine binnenkomende transporten.

Door het verwaarlozen van de randvoorwaarde dat er geen zand door de waterspiegel kan worden getransporteerd, ontstaat een fout in de aanzanding. In bijlage XII is berekend dat de hersteltijd hierdoor voor  $r = 0,03$  m tot maximaal 2 jaar en voor  $r = 0,12$  m tot maximaal  $3\frac{1}{2}$  jaar kan oplopen.

Tussen de twee laatste zandsuppleties op de Kop van Goeree lag een periode van 7 jaar. In een dergelijke periode kan de winput dan ook ruimschoots aanzanden. Een volgende zandsuppletie op de Kop van Goeree - waarschijnlijk over 7 jaar - zou opnieuw door inzet van de punaise in het ondiep gelegen wingebied A ( $\approx$  NAP - 3,0 m) kunnen worden uitgevoerd.

De invloed van de taludhelling op de hersteltijd kan worden geschat door een zeer flauw talud in gedachte te nemen. De traptreden zijn dan weer zo lang dat op de rand van de traptreden van het bovenstroomse talud het evenwichtstransport  $S_E$  wordt bereikt. Zo ook op de trede van NAP - 11,0 m. Dit evenwichtstransport is lager dan het uitgaande transport van diezelfde trede bij een helling van 1 : 10, omdat in die situatie het evenwichtstransport door de kortere lengte van de trede nog niet was bereikt. Het uitgaande transport van de trede op NAP - 11,0 m is het binnenkomend transport van de laagste trede op NAP - 13,0 m. Bij flauwe taluds wordt er dus minder zand op de laagste trede aangevoerd dan bij steilere taluds. De aanzanding van de laagste trede is dan ook geringer en de trede komt dan ook langzamer omhoog. De hersteltijd is voor het flauwe talud dan ook groter dan die voor steile taluds.

Hoeveel groter de hersteltijd bij een flauwer talud dan 1 : 10 zal zijn, kan pas worden bepaald nadat de berekening voor dat flauwere talud

is herhaald. Daarvan is afgezien. Overigens werd niet verwacht dat bij een helling van 1 : 20, de kleinst gemeten waarde in de winputten van de Roggenplaat (bijlage IX), een veel grotere hersteltijd dan bij een helling van 1 : 10 zou worden gevonden.

Bij de berekening van de aanzanding is gebruik gemaakt van de in paragraaf 6.4.2. berekende binnenkomende zandtransporten en de in paragraaf 6.3. berekende stroombeelden in de winput. In beide paragrafen is gewezen op de beperkingen van de modellen, de betrouwbaarheid van de gehanteerde parameters en de vrij grove schematisaties. Voor de berekening van de aanzanding geldt dit uiteraard evenzeer.

Daarnaast wordt erop gewezen dat voor de berekening van de evenwichtstransporten op de verschillende treden is uitgegaan van dezelfde ribbelhoogte en korreldiameter als op de bovenste trede van de winput. Uit de boringen (paragraaf 5.2.8.) blijkt dat de korreldiameters met de diepte verschillen. Ook een constante ribbelhoogte over de diepte lijkt onwaarschijnlijk. Wat de invloed hiervan op het verloop van de aanzanding op de hersteltijd is, is niet nader onderzocht.

In paragraaf 6.4.2. is opgemerkt dat de erosie op de laagste treden van het benedenstroomse talud bij het model van Boeters te laag zou zijn en op de hoogste treden juist te hoog in vergelijking met het model van Bijker. In de figuren 62 en 63 zou het getekende benedenstroomse talud na 1 week steiler moeten zijn.

Het model van Boeters gaat voorbij aan het feit dat de stroomsnelheid waarbij het zand uitzakt en op de bodem blijft liggen, kleiner is dan de snelheid om het zand weer uit de bodem los te maken. In werkelijkheid zullen het in- en uitgaande transport van de winput dan ook niet gelijk zijn. Door dit verschil zal de inhoud van de winput afnemen. Bij gebruik van het model van Boeters zijn in- en uitgaand transport van de winput gelijk. Op grond van de continuïteit verandert de put niet van inhoud, maar wel van vorm.

Voor het berekenen van de hersteltijd is daarom slechts bezien hoe



snel het diepste punt van de winput omhoog komt. Door het ver-  
waarlozen van de verschillen in de kritieke stroomsnelheid voor  
bezinken en voor erosie is de berkende hersteltijd te hoog. Overi-  
gens wordt niet verwacht dat hierdoor het in de figuren 62 en 63  
geschetste verloop van de aanzanding van de winput sterk zal  
veranderen.

Tot besluit wordt het volgende geconcludeerd. Met het uitgebreide  
model van Boeters kan op eenvoudige wijze een redelijk inzicht  
worden verkregen in het verloop van de aanzanding van een winput  
en de hersteltijd waarna de oorspronkelijke situatie in het winge-  
bied vrijwel hersteld zal zijn. Dit ondanks de beperkingen die een  
handberekening oplegt, en de onvolkomenheden van het model. Een  
winput, gezogen in het wingebied A, zal afhankelijk van de ribbel-  
hoogte in maximaal 2 tot  $3\frac{1}{2}$  jaar weer aanzanden. De invloed van  
de winning strekt zich circa 5 km buiten de winput uit en bestaat  
uit een bodemverlaging van ongeveer 0,2 m. Omdat dit gebied zich  
voor de ebstroom stroomafwaarts van de winput uitstrekt en de eb-  
stroom van de kust van Goeree is afgericht, behoeft niet voor na-  
delige gevolgen voor die kust te worden gevreesd. Door inzet van  
de punaise in ondiep gelegen wingebied A ( $\approx$  NAP - 3,0 m) kan nu  
en ook in de toekomst de Kop van Goeree door zandsuppletie worden  
onderhouden.

## 7. CONCLUSIES

Uit het voorgaande zijn vele conclusies te trekken. De belangrijkste daarvan zijn:

- Na de afdammingen van het Haringvliet in 1971 en het Brouwershavensche Gat in 1972 is de geul het "Schaar" voor de duinenrij op de Kop van Goeree een steeds grotere bedreiging geworden. (fig. 5)
- De voor de kust gelegen zandbank de "Ooster" is een goede golfbreker die de duinen op de Kop van Goeree tegen zware golfaanvallen beschermt. (fig. 5)
- De duinenrij op de Kop van Goeree vormt op grond van de leidraad (lit. 8) vooralsnog een goede waterkering. De verwachtingswaarde voor de bezwijfrequentie is kleiner dan  $10^{-5}$ /jr. Aangenomen mag worden dat dit tot na het jaar 2000 zo zal blijven, vooropgesteld dat de zandbank de "Ooster" blijft bestaan.
- Achter de zandbank de "Ooster" treedt in 4 afzonderlijke gebieden van nature voldoende aanzanding op om eens in de acht jaar één miljoen  $m^3$  zand te winnen voor een zandsuppletie op de Kop van Goeree zonder dat dit nadelige gevolgen zal hebben voor de veiligheid van de duinenrij op de Kop van Goeree. (fig. 39)
- Op basis van de werkomstandigheden waarover in hoofdstuk 5 van dit rapport een uitspraak is gedaan, is van de vier vergeleken wingebieden het verst van de kust gelegen wingebied A het meest geschikt. (fig. 39)
- Met het model VXCST kan een betrouwbaar stromingsbeeld in een oneindig lang veronderstelde geul worden beschreven, waarbij rekening wordt gehouden met de hoek die de aankomende stroming met de geulas maakt.
- Met het uitgebreide model van Boeters kan op eenvoudige (handmatige) wijze een redelijk inzicht worden verkregen in het verloop van de aanzanding van een winput en de hersteltijd waarin de oorspronkelijke situatie in het wingebied vrijwel hersteld zal zijn. Dit ondanks de beperkingen die een handmatige berekening oplegt,

en de onvolkomenheden van het model.

- Uit de berekeningen met het uitgebreide model van Boeters voor een winput met een inhoud van  $10^6 \text{ m}^3$ , gezogen in wingebed A (fig. 39), blijkt dat de hersteltijd, afhankelijk van de ribbelhoogte  $r$ , maximaal 2 tot  $3\frac{1}{2}$  jaar bedraagt.
- Bij winning van zand in wingebed A (fig. 39) behoeft volgens de berekeningen met het uitgebreide model van Boeters niet voor mogelijk nadelige gevolgen voor de kust van Goeree te worden gevreesd.
- Door inzet van de punaise in het ondiep gelegen wingebed A (fig. 39) ( $\approx \text{NAP} - 3,0 \text{ m}$ ) kan nu en ook in de toekomst de Kop van Goeree door zandsuppletie worden onderhouden.

## 8. NADER ONDERZOEK

Vele vragen blijven open na deze studie. Daarnaast zijn er veronderstellingen gedaan. Het beantwoorden van de open gebleven vragen en het onderzoek naar de juistheid van de veronderstellingen behoren tot de hieronder volgende aanbevelingen voor nader onderzoek.

- Studie naar langstransporten bij sterk gebogen kusten tijdens stormvloed.
- Studie naar de toename in golfhoogte achter een zandbank door de invloed van wind nadat de golven op die bank zijn gebroken.
- Onderzoek naar de herkomst van het zand dat bij de zandbank de "Ooster" wordt afgezet.
- Onderzoek van de gevolgen van zandwinning op het westelijke geultalud van het "Schaar", voor de duinen op de Kop van Goeree en voor de geul het "Schaar" zelf.
- Een gedetailleerd grondonderzoek in de wingebieden A, B, C en D.
- Een onderzoek naar de invloed van golven op de breshellingen van een winput.
- Studie van de vervuiling in de wingebieden A, B, C en D, die het zuigproces kunnen verstoren.
- Studie naar de kosten van de uitvoering van de zandsuppletie op het strand van Goeree met behulp van de punaise, ingezet in de wingebieden A en D.
- Het verrichten van metingen in wingebied A om de waarden van de invoerparameters die voor de berekening van de zandtransporten en de aanzanding van een winput worden gehanteerd, zoals stroomsnelheden en stroomrichtingen, korreldiameters van het zand en ribbelhoogten, te bepalen.
- Driedimensionale berekeningen van de stroombeelden in een winput, ondersteund met metingen in een model of in de natuur.

## LITERATUURLIJST

- 1 Nota WWKZ-80.G002 Morfologisch onderzoek m.b.t. zanddam, westhoofd Goeree, januari 1980.
- 2 Nota W-70.102 Welke maatregelen moeten in 1970 worden getroffen om de Kop van Goeree te beschermen?, september 1970.
- 3 Onderzoek naar zandtransporten langs een ten westen van Goeree geprojecteerde zanddam en langs de kust van Goeree, afstudeerverslag J. van Overeem, januari 1978.
- 4 Interpretatie van de berekeningen "Morfologie rond de Kop van Goeree" projekt 237, Ing. bureau Svasek BV, oktober 1977.
- 5 Nota WWKZ-81.Go13 Berekeningsmethodem sedimenttransport m.b.t. zanddam Goeree, december 1981.
- 6 Nota W-70.001 De bescherming van de Kop van Goeree, februari 1973.
- 7a Nota WWKZ-82.S003 Onderzoek naar de achteruitgang van de kust langs de Kop van Goeree 1977-1982, augustus 1982.
- 7b Notitie WWKZ-83.S219 Onderzoek naar de achteruitgang van de kust langs de Kop van Goeree 1977-1983, juni 1983.
- 8 Leidraad voor de beoordeling van de veiligheid van duinen als waterkering, Technische Adviescommissie voor de waterkeringen, concept februari 1984.
- 9 Energy loss and set-up due to breaking of random waves, J.A. Battjes and J.P.F.M. Janssen, Proceedings 16<sup>th</sup> international coastal engineering conference, Hamburg 1978, III, p. 569-587.
- 10 On non-saturated breakers and the wave run-up, Le Méhauté, Proceedings 8<sup>th</sup> international coastal engineering conference, Mexico 1962, p. 77-92.

- 11 Bestek en voorwaarden voor het uitvoeren van een zandsuppletie op het strand van de Noordzeekust van Goeree Nr. ZH 2841, juni 1984.
- 12 Randvoorwaarden voor het inzetten van Baggerwerktuigen, collegediktaat Prof. ir. J. de Koning, augustus 1978.
- 13 Nota zandsuppletie Westhoofd Goeree 1977, Bergen op Zoom, februari 1979.
- 14 Coastal engineering, volume II, Harbour and Beach problems, collegediktaat Prof. dr. ir. E.W. Bijker e.a., 1978.
- 15 Notitie WWKZ-83.S238 Onderzoek verdeling golf- en windfrequenties LS/LE Goeree 1949-1982, december 1983.
- 16 Shore Protection Manual, U.S. Army, Coastal Engineering Research Center, 1973.
- 17 Siltation in dredged channels, Prof. dr. ir. E.W. Bijker, niet gedateerd.
- 18 Study of the dredging of the access channel to the port of Bahia Blanca, Neduco-Arconsult , 1983.
- 19 The flow across trenches at oblique angle to the flow, Rapport S490 van het W.L., S. Boer, januari 1984.
- 20 Sedimentatie in gebaggerde sleuven, afstudeerverslag R. Boeters, juli 1984.



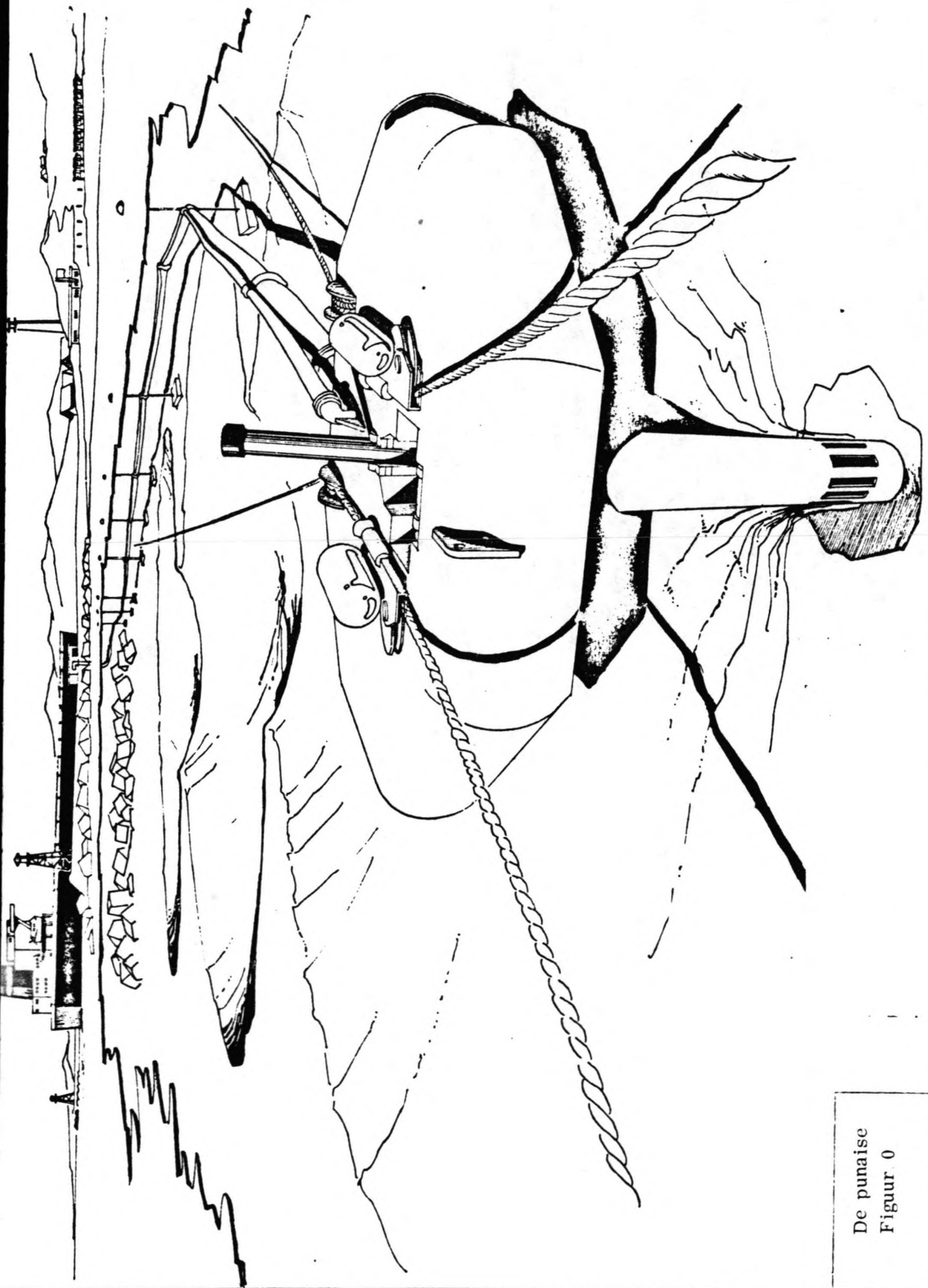
## LIJST VAN FIGUREN

- 0 De punaise
- 1 De delta van Zuid-West Nederland
- 2 Het kustgebied van Goeree
- 3 Principeschetsen ontstaan van delta
- 4 Ligging zandbank de "Ooster"
- 5 Ligging van de geul het "Schaar" en de zandbank de "Ooster"
- 6 Golf-en getijtransport bij de zandbank de "Ooster"
- 7 Verandering van de bodemligging in de periode '72-'81
- 8 Toekomstige bodemligging van de delta van Zuid-West Nederland
- 9 Stroomsnelheden in het "Schaar" voor en na de afdammingen van het Haringvliet en het Brouwershavensche Gat
- 10 Verdieping van het "Schaar" (raai 16.50)
- 11 Verdieping van het "Schaar" (raai 16.01)
- 12 Verdieping van het "Schaar" (raai 15.50)
- 13 Geschematiseerde dieptelijnen studie van J. van Overeem
- 14 Geschematiseerde middendieptelijnen ing. bureau Svasek
- 15 Indeling van de kust op de Kop van Goeree in stroken
- 16 Grenzen van de kuststroken I en II in het dwarsprofiel van raai 16.01
- 17 Verwachtingswaarde voor de golfhoogte als functie van het stormvloedpeil
- 18 Grafiek ter bepaling van de significante golfhoogte H en de golfperiode T in zeegang uit de windsnelheid U en de duur t of de windbaan F
- 19 Sector van waaruit een golfveld met een significante golfhoogte van 8,2 m en een piekperiode van 12 s Goeree kan bereiken
- 20 Kustprofielen 1982

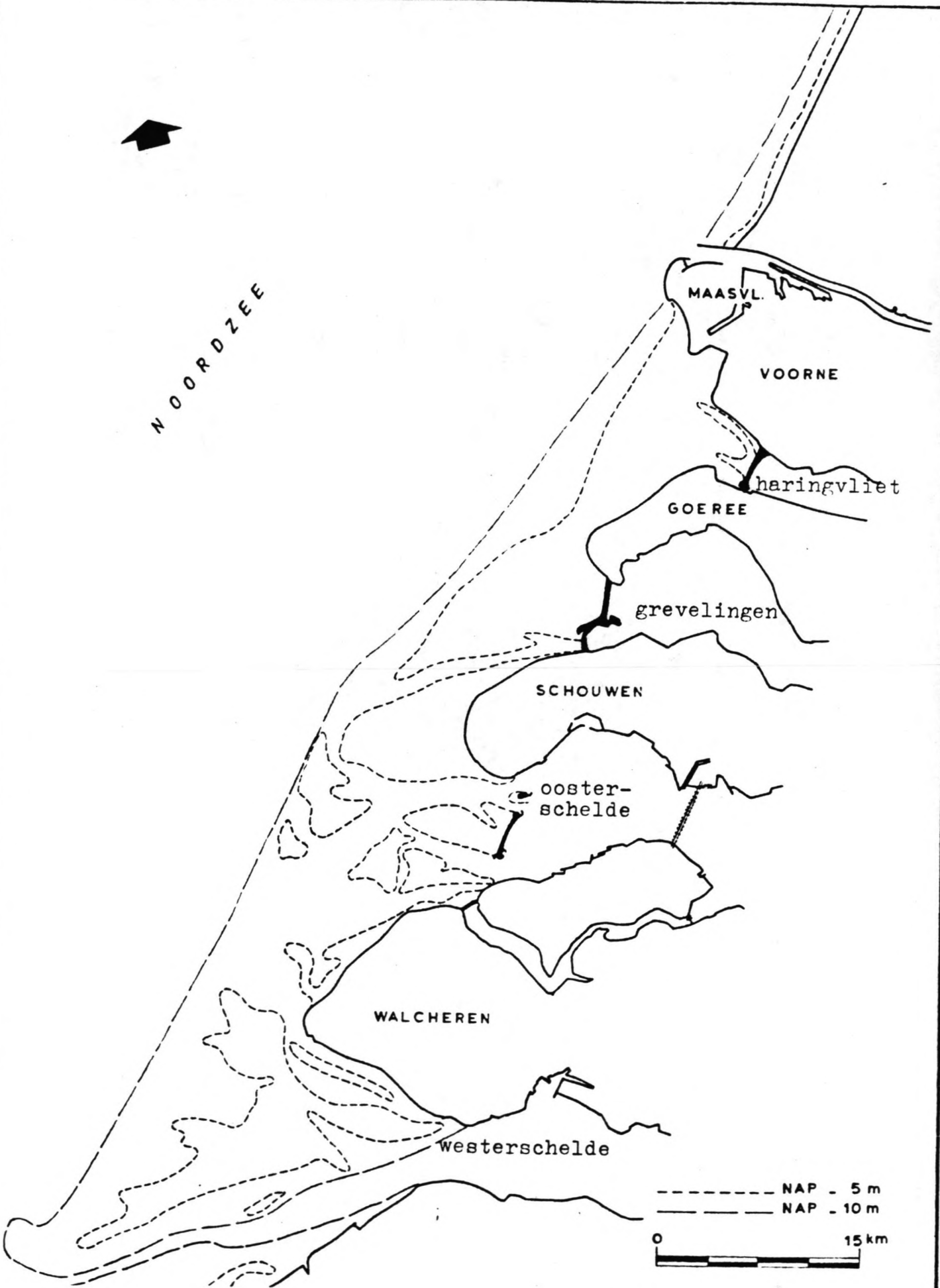
- 21 Verloop van de waterdiepte  $h$  en de golfhoogte  $H_{rms}$  bij golfaanval uit het noorden in raai 16.50
- 22 Vertaling van de situatie met bank en geul naar de situatie met bank en geul
- 23 Definitieschets van het afslagprofiel
- 24 Afslagprofiel in het duinprofiel van raai 14.50
- 25 Afslagprofiel in het duinprofiel van raai 16.50
- 26 Definitieschets voor de toeslag op de berekende duinafslag
- 27 Ontwerpafslaglijn raai 16.50
- 28 Invloed gradiënt langstransport
- 29 Definitieschets grensprofiel en minimumprofiel raai 16.50
- 30 Geschematiseerde kustlijn van Goeree en kruinlijn over de zandbank de "Ooster" volgens Svasek
- 31 Gemeten zandtransporten en berekende golftransporten langs de kust van Goeree en de zandbank de "Ooster" volgens Svasek
- 32 Door Svasek berekende golftransporten met gebieden van aanzanding en erosie in het kustgebied van Goeree
- 33 Door Bakker en Speekenbrink berekende getijtransporten (zonder correctiefactor) in het kustgebied van Goeree
- 34 Berekende golftransporten (Svasek) en berekende getijtransporten inclusief correctiefactor (Bakker en Speekenbrink) met gebieden van aanzanding en erosie in het kustgebied van Goeree
- 35 Gemiddelde jaarlijkse aanzanding in de wingebieden, gemeten over de periode 1970-1980
- 36 Aanzandingsgebieden en de bodemligging in 1972
- 37 Ontwikkeling van de zandbank de "Ooster" in de periode '72-'81
- 38 Gemeten en berekende aanzanding in het kustgebied van Goeree
- 39 Ligging wingebieden, boringen en meetpalen
- 40 Lodingen wingebied A (1980) met geschematiseerde dieptelijnen

- 41 Waterstands-, stroomsnelheids- en stroomrichtingskromme  
(20 maart 1970)
- 42 Geschematiseerde waterstands-, stroomsnelheids- en  
stroomrichtingskromme
- 43 Golfmeetpaal BG V. Overschrijdingskromme voor de  
golfhoogte  $H \frac{1}{3}$
- 44 Tabel voor het berekenen van golfparameters
- 45 Gemiddeld jaarlijks zandtransport bij eb en vloed als functie  
van de golfhoogte en de overschrijdingsfrequentie
- 46 Concentratievertikalen voor de golfhoogten van 0,6 m en 2,6 m  
bij ribbelhoogten van 0,03 en 0,12 m
- 47 Proefgeul bij Bahia Blanca (Argentinië) met de roosterpunten  
daarin zoals gehanteerd bij het computerprogramma ODYSSEE
- 48 Schematisatie van de proefgeul bij Bahia Blanca
- 49 Stromingsbeelden in de proefgeul bij Bahia Blanca (Argentinië)  
berekend met VXCST
- 50 Geschematiseerde winput
- 51 Stroombeeld in de winput met de lengte-as onder een hoek van  
 $50^{\circ}$  met het noorden en een waterstand van NAP -0,7 m
- 52 Idem, met een hoek van  $50^{\circ}$  met het noorden en een  
waterstand van NAP +1,1 m
- 53 Idem, met een hoek van  $140^{\circ}$  met het noorden en een  
waterstand van NAP -0,7 m
- 54 Idem, met een hoek van  $140^{\circ}$  met het noorden en een  
waterstand van NAP +0,4 m
- 55 Idem, met een hoek van  $140^{\circ}$  met het noorden en een  
waterstand van NAP +1,1 m
- 56 Concentratie-, stroomsnelheids- en transportverdeling over de  
vertikaal bij de exponentiële verdeling en bij gebruik van de  
Bijkerformule

- 57 Definitieschets in- en uitgaand transport per traprede en de lengte van de trede onder een stroomlijn
  - 58 Verloop van het zandtransport  $S(x)$  en bodemconcentratie  $c_b(x)$  volgens Boeters en volgens Bijker
  - 59 Definitieschets voor de uitbreiding van het model van Boeters
  - 60 Definitieschets van het uitgebreide model van Boeters
  - 61 Verloop van het zandtransport  $S(x)$  volgens Boeters en volgens Bijker bij erosie
  - 62 Verloop van de aanzanding van de winput voor  $r = 0,03$  m
  - 63 Idem, voor  $r = 0,12$  m
  - 64 Verhoging van het diepste punt van de winput in de tijd
  - 65 Ligging omslagpunt aanzanding/erosie met en zonder golven bij eb en vloed voor  $r = 0,03$  m
-



De punaise  
Figuur 0

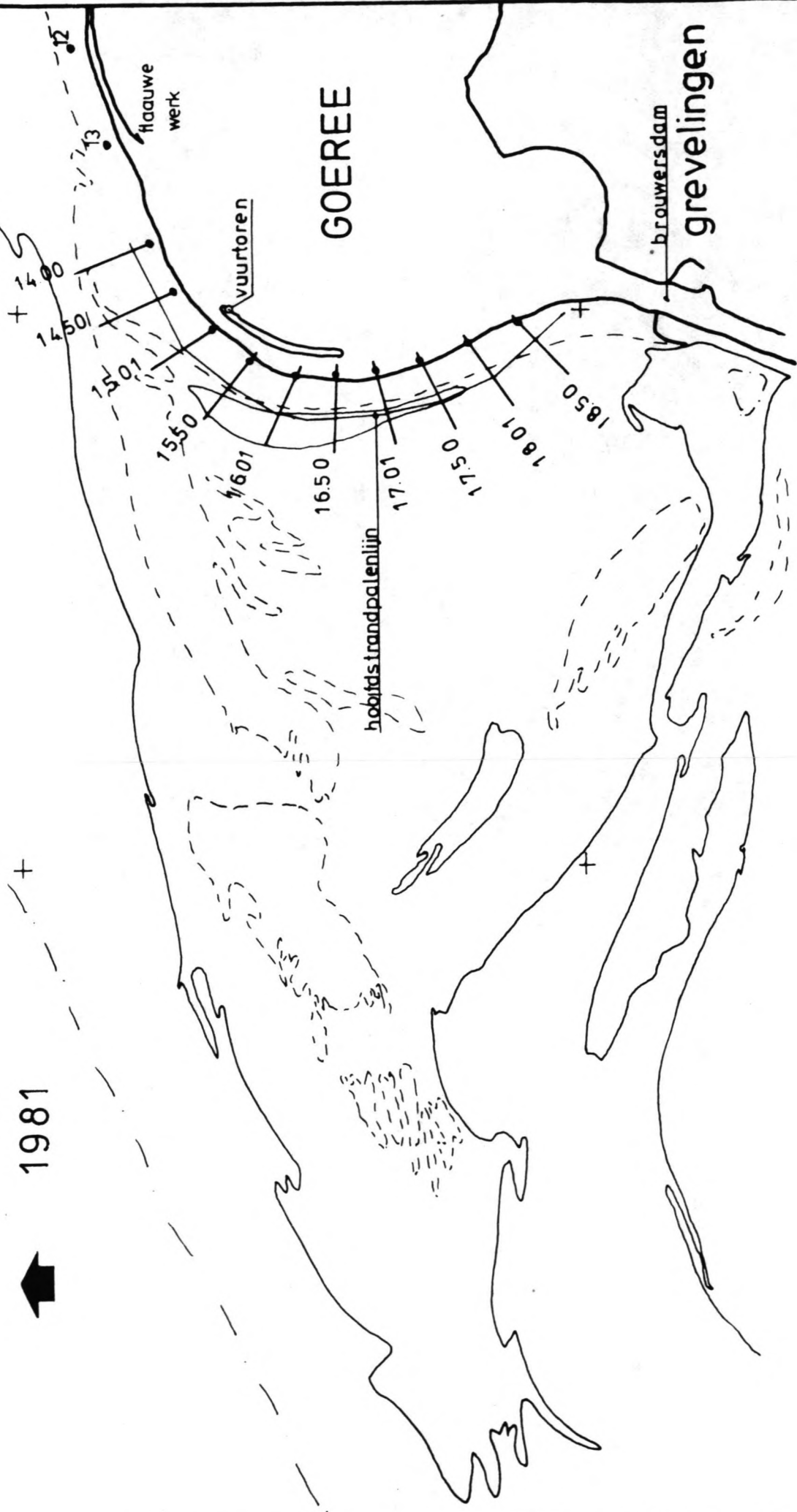


De delta van zuidwest-Nederland

Figuur 1

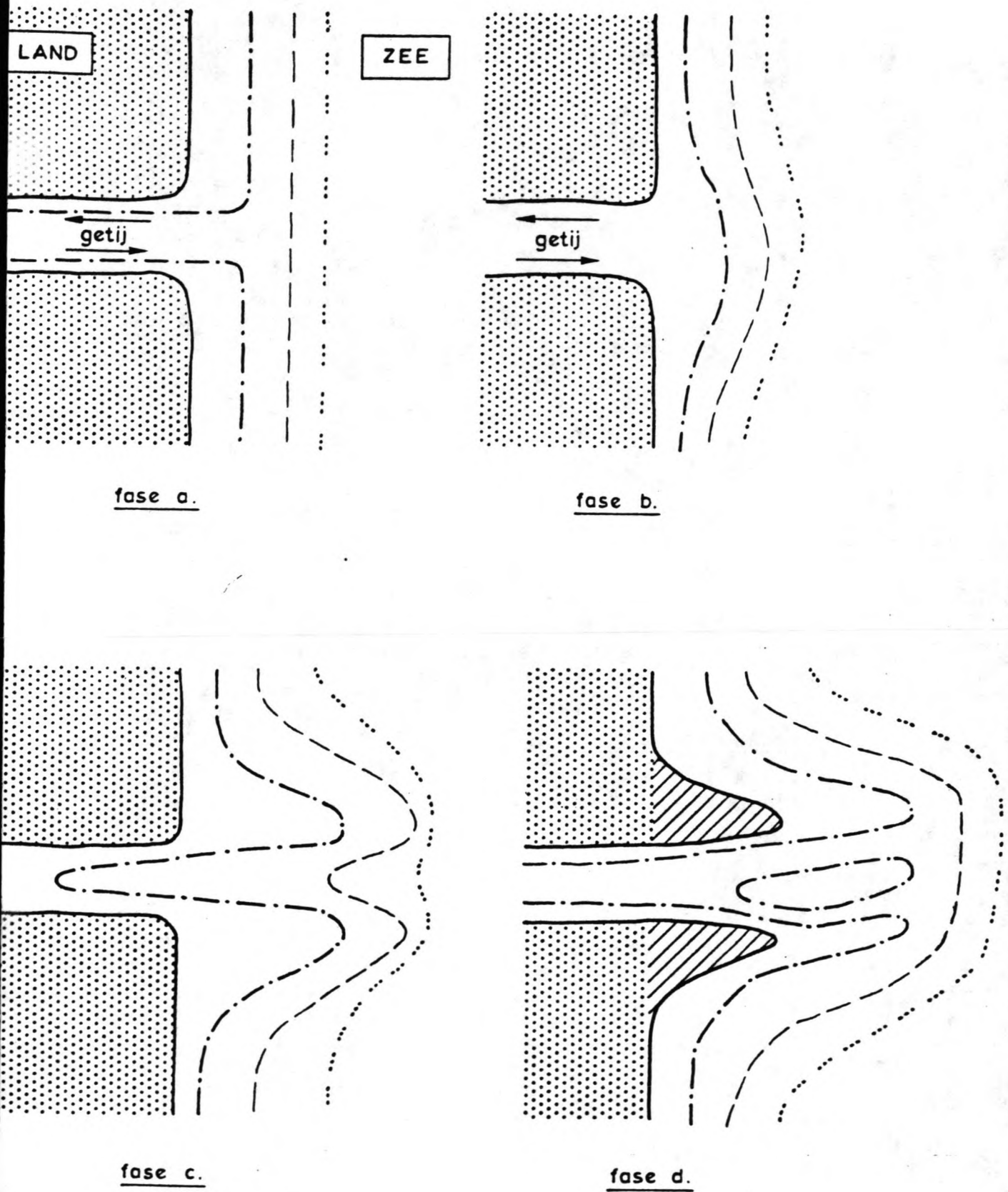


1981



- NAP -2.50 m
- NAP -5.00 m
- NAP -10.00 m

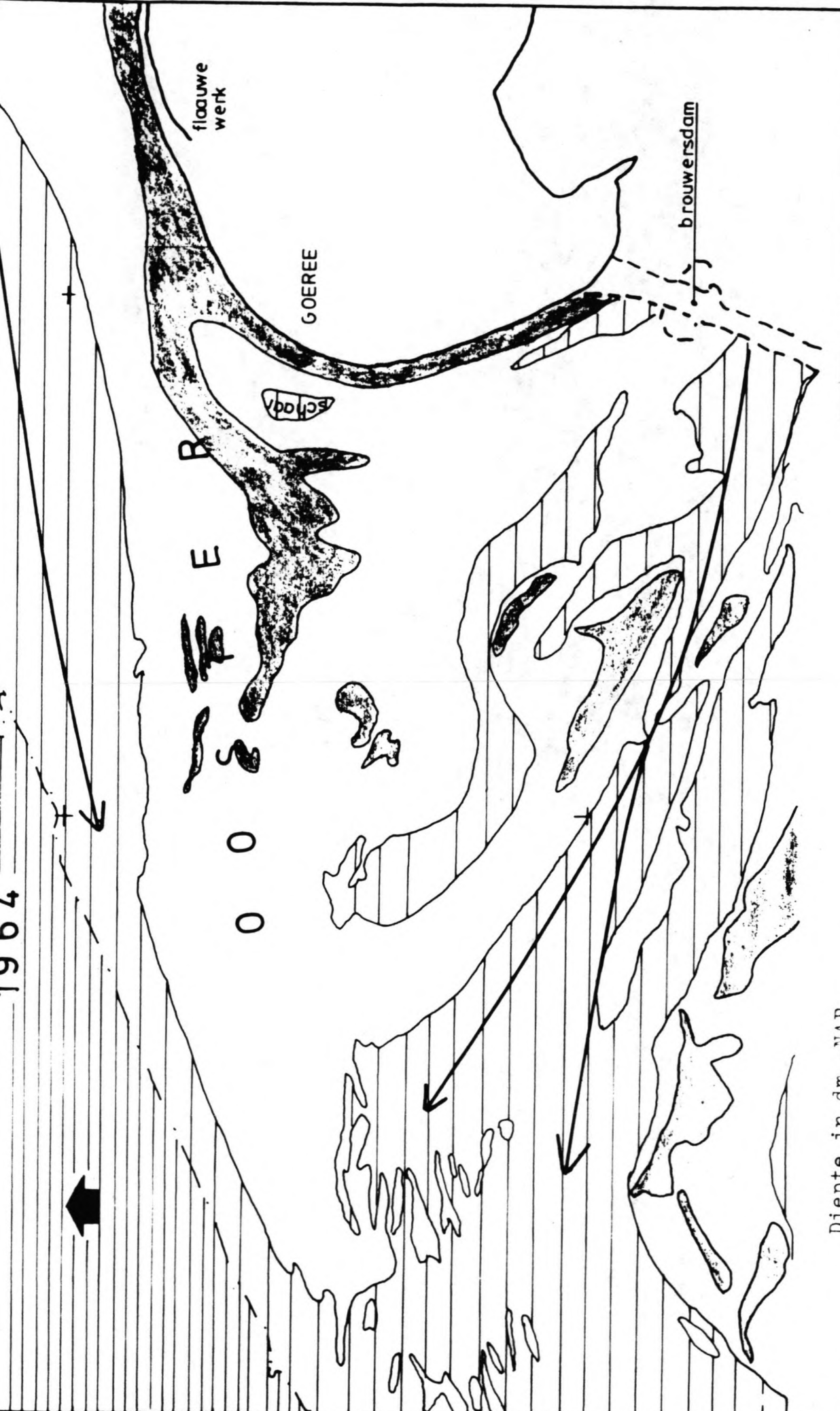
Het kustgebied van Goeree  
Schaal 1:50,000  
Figuur 2



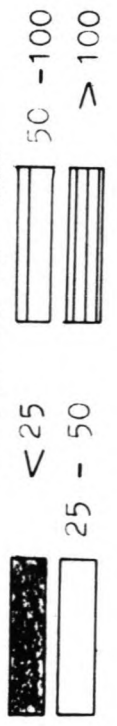
swaterstaat  
 tie waterhuishouding en waterbeweging  
 ct kust en zee

figuur 3

1904



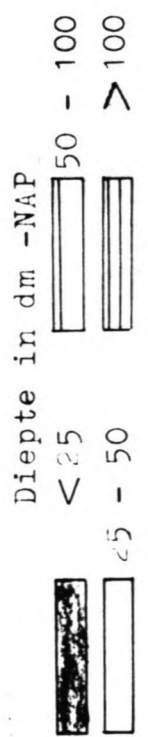
Diepte in dm -NAP



EBSTROOF

Ligging zandbank 'Ooster'  
 Schaal 1:50,000  
 Figuur 4

1981

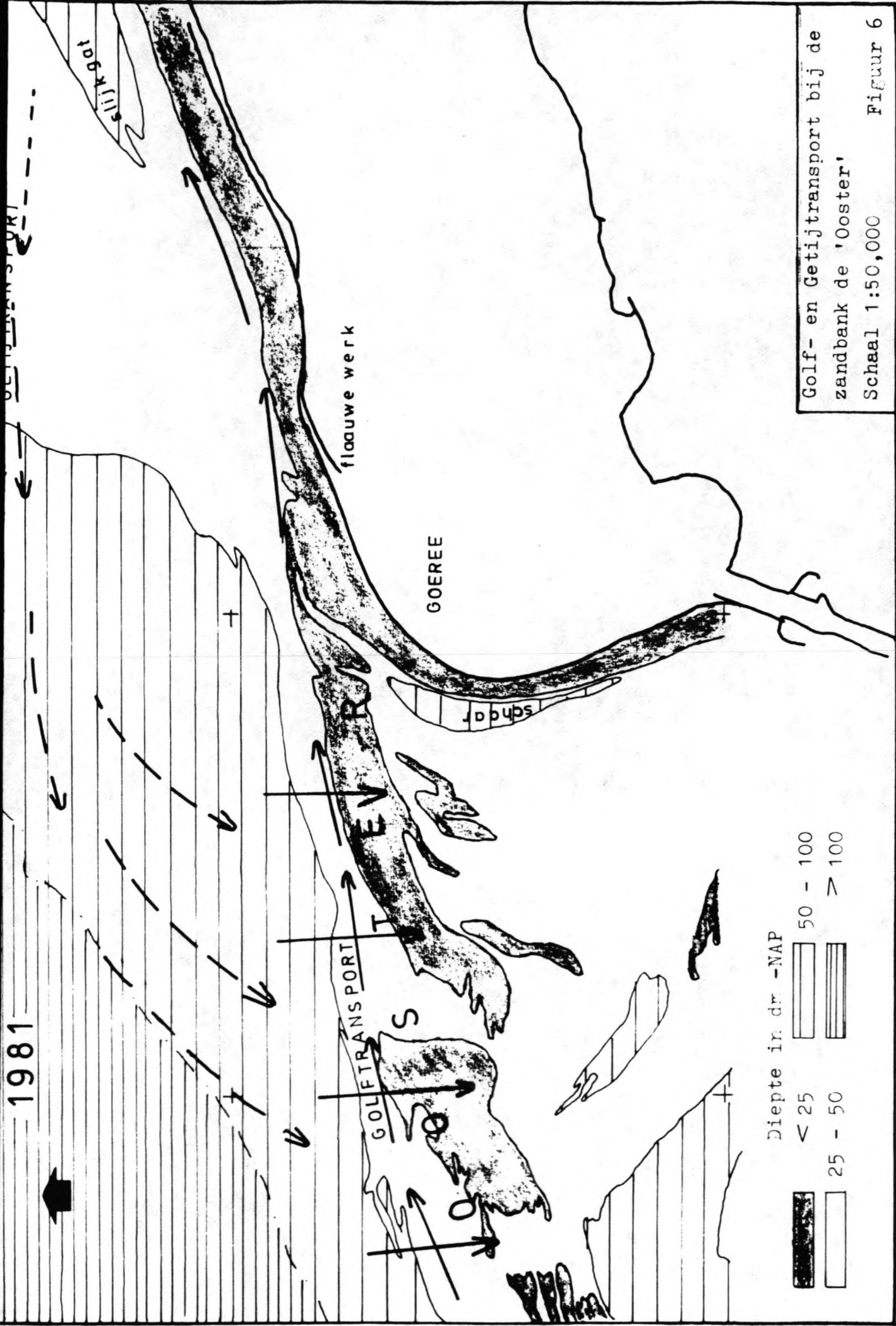


Ligging van de geul het 'Schaar'  
 en de zandbank de 'Ooster'  
 Schaal 1:50,000      Figuur 5



1981

DEINSLANDSTADT



Diepte in dr -NAP

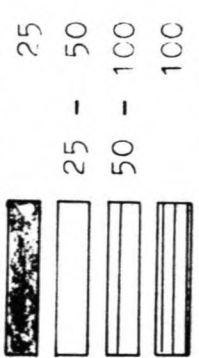
	< 25
	25 - 50
	50 - 100
	> 100

Golf- en Getijtransport bij de zandbank de 'Ooster'  
 Schaal 1:50,000  
 Figuur 6

1981



Diepte in dm -NAP (situatie '81)



Dieptelijnen '81

Dieptelijnen '72

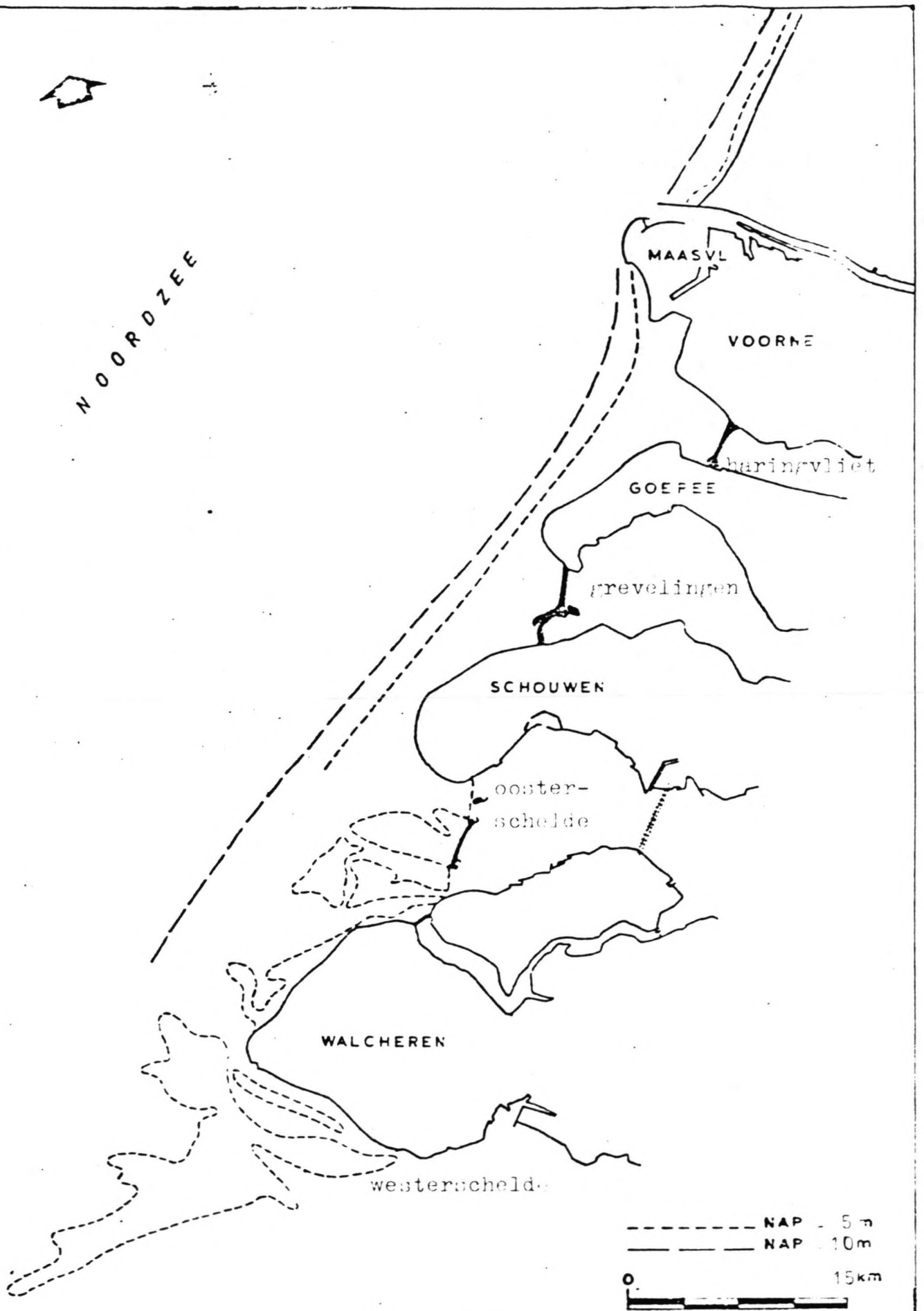
Verplaatsing NAP -5.0m lijn

Bodemverhoging

Bodemverlaging

Verandering van de bodemligging  
 in de periode '72 - '81  
 Schaal 1:50,000  
 Figuur 7

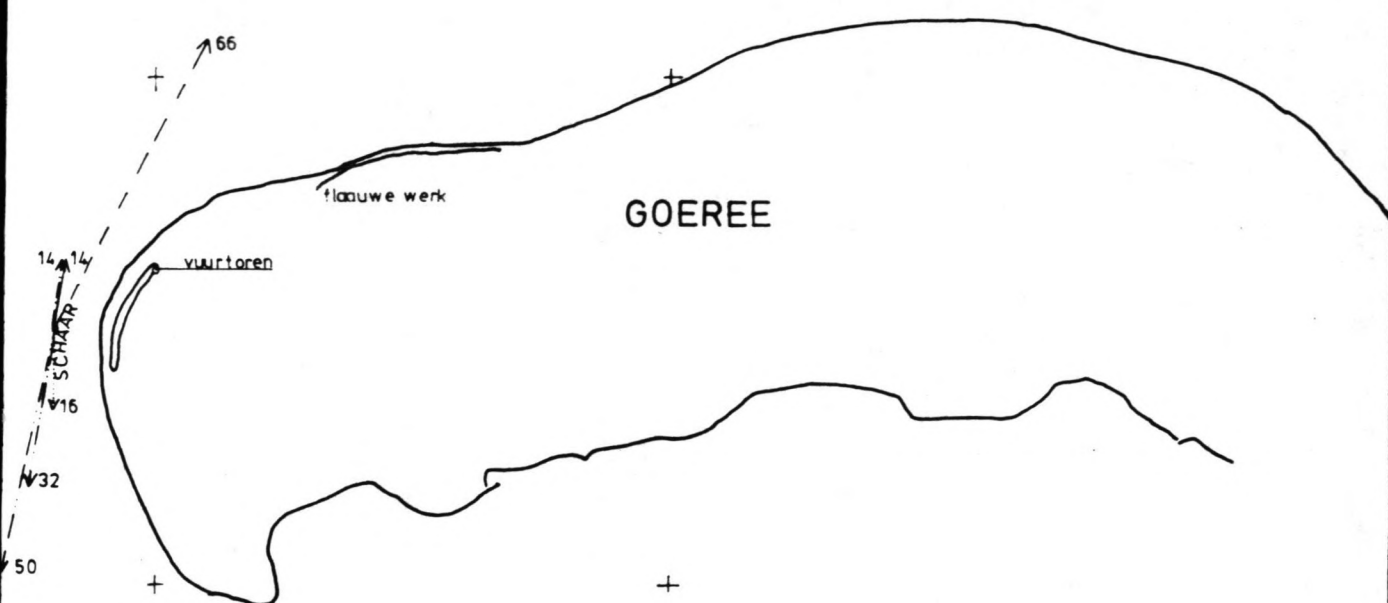




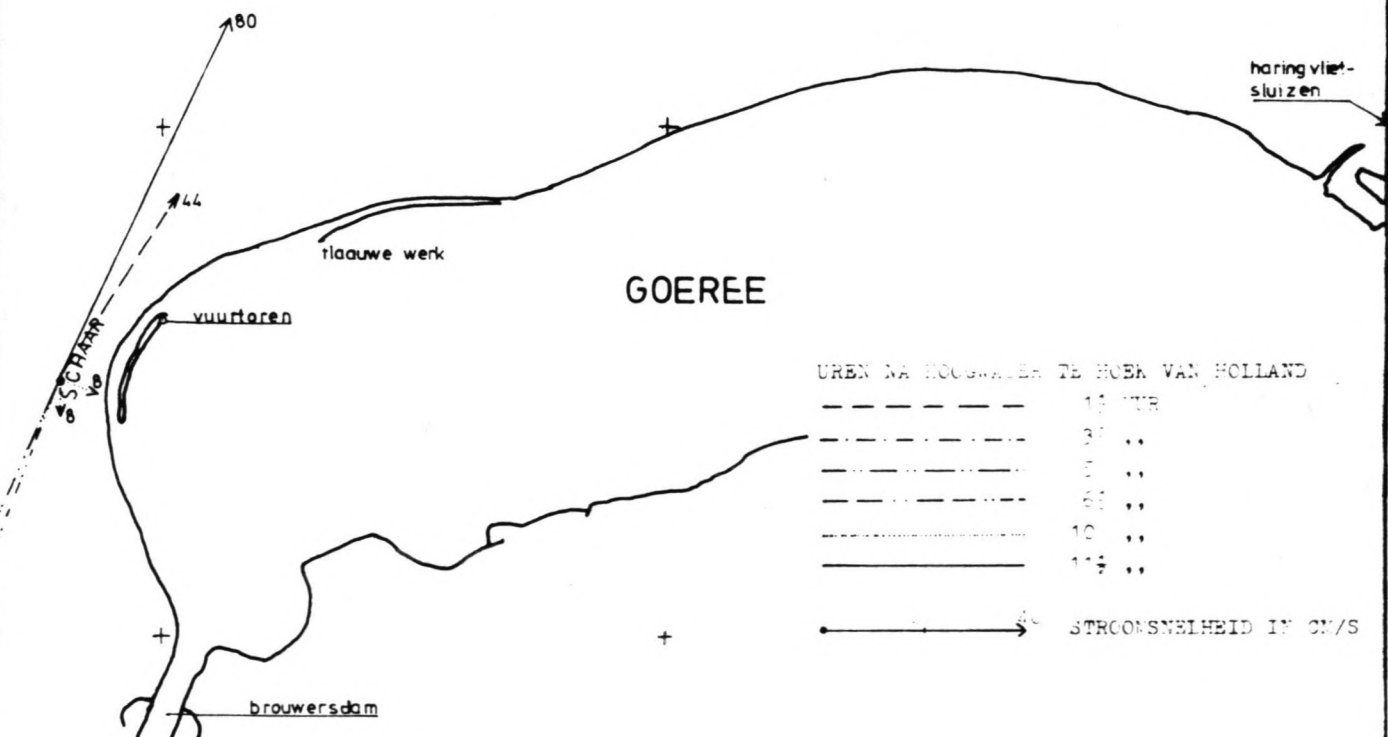
Toekomstige bodemligging van de delta van zuidwest-Nederland

Figuur 9

voor afdammingen



na afdammingen



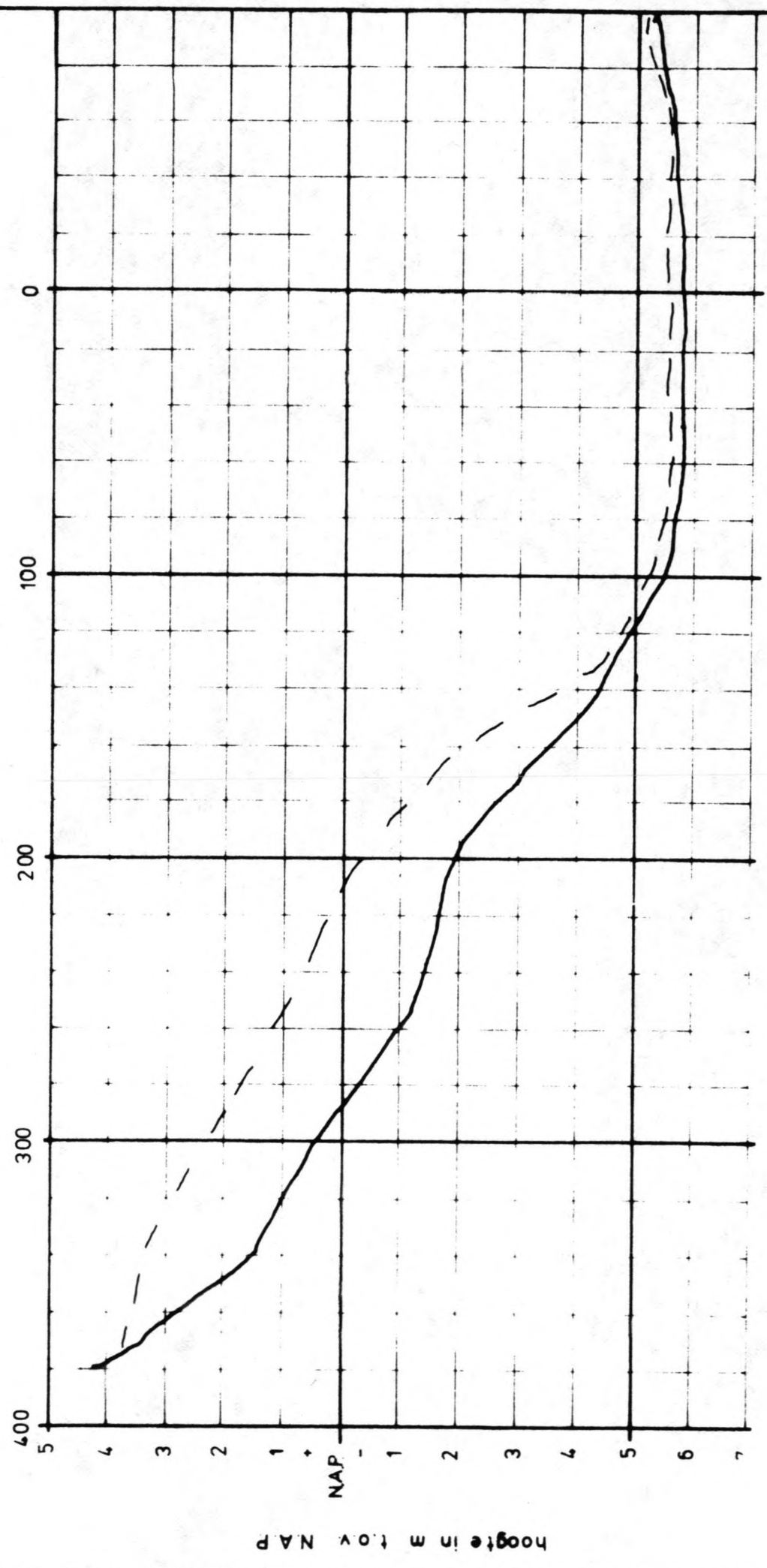
UREN NA HOOGWATER TE HOEK VAN HOLLAND

-----	15	uur
- - - - -	30	..
.....	45	..
-----	60	..
.....	75	..
-----	90	..

→ STROOMSNELHEID IN CM/S

Stroomsnelheden in het schar voor en na de afdammingen van het Haringvliet en het brouwershavensche Gat

Figuur 9

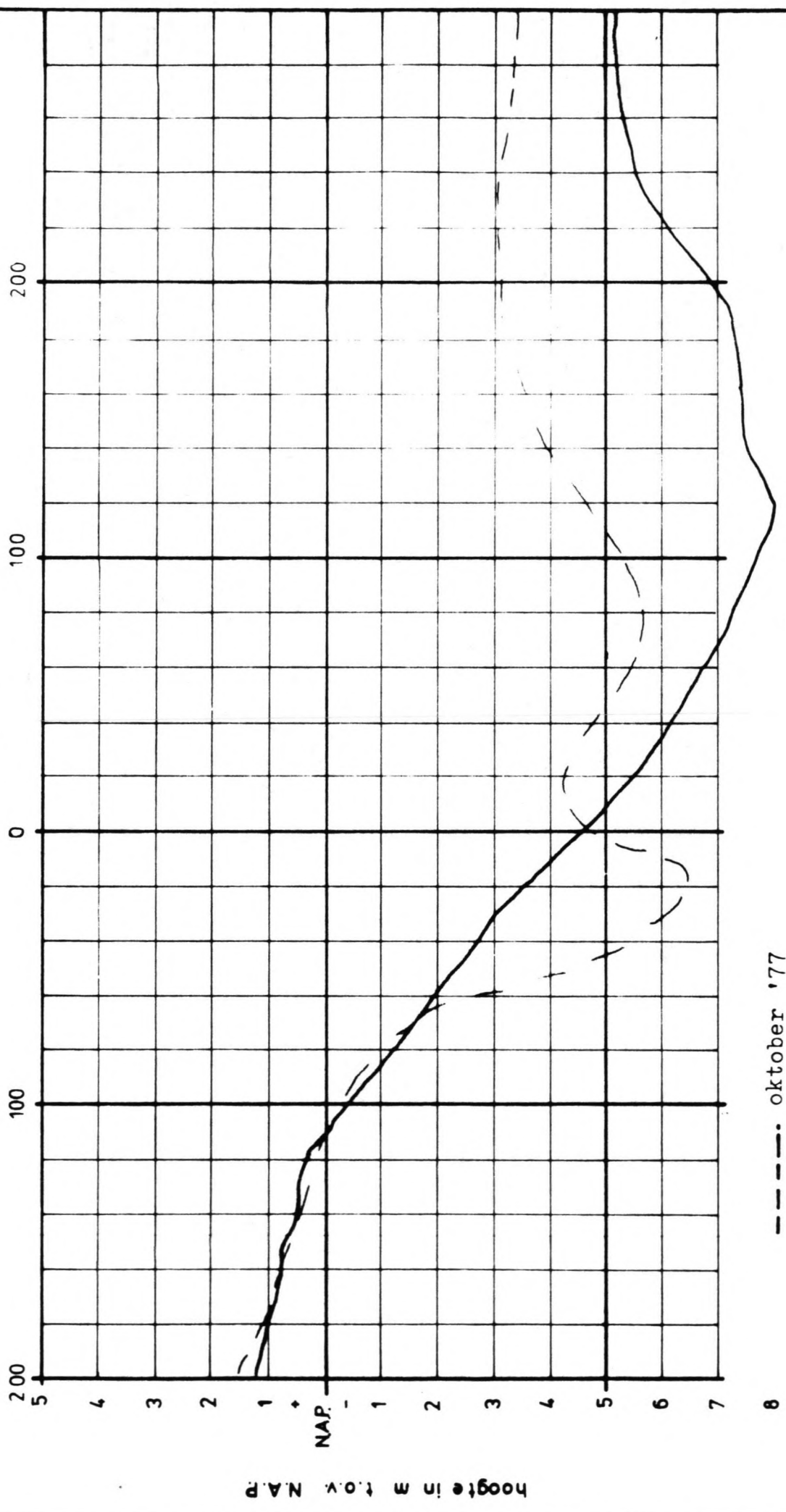


--- oktober 1977  
 ——— 1973

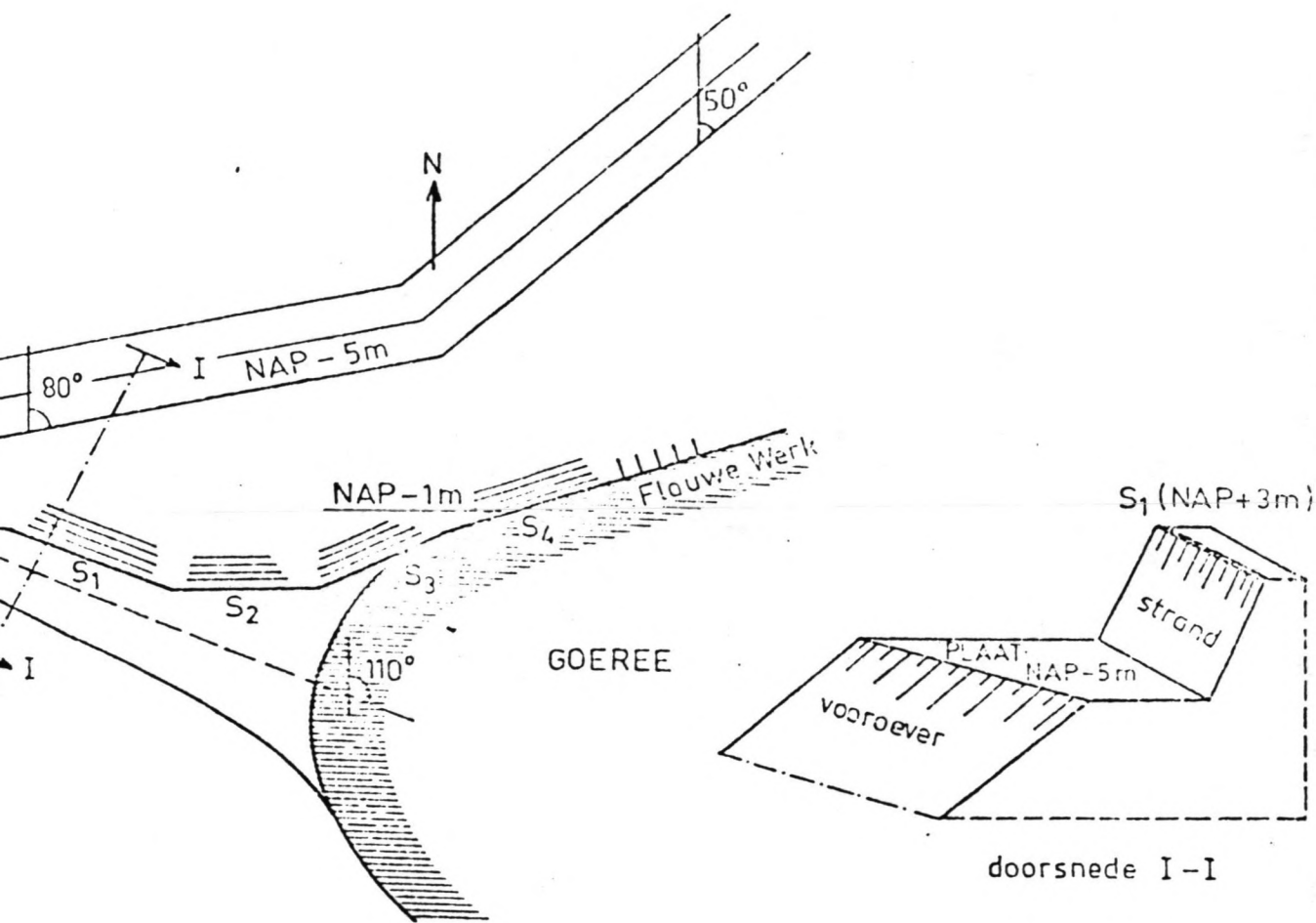
Verdieping van het 'Schaar'  
 Figuur 10



RAAI 1550 (voor locatie zie figuur 2)



Verdieping van het 'Schaar'  
Figuur 12

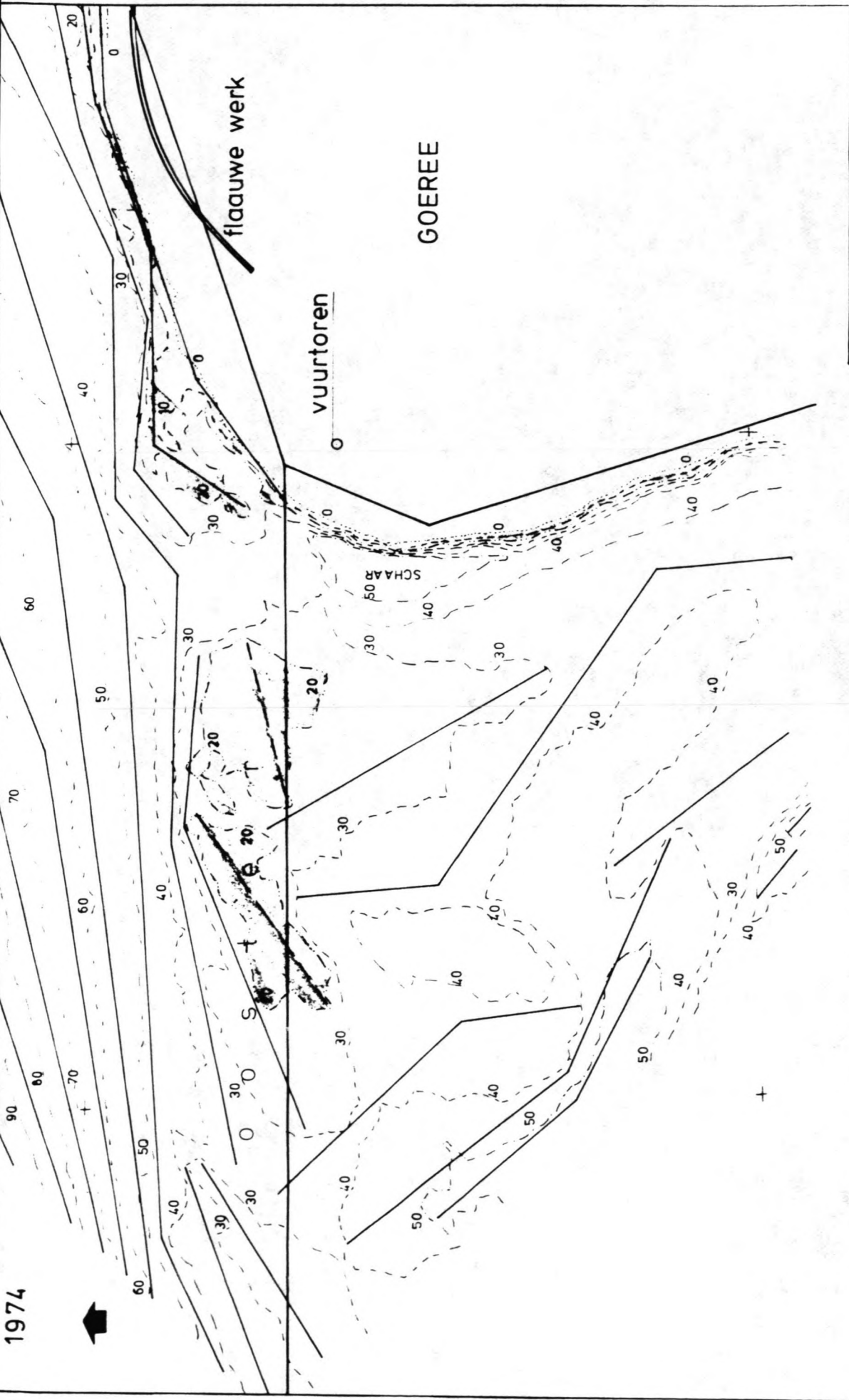


Geschematiseerde dieptelijnen  
studie van J. van Overeem

Figuur 13



1974



— GESCHEMATISEERDE  
MIDDENDIEPTELIJN

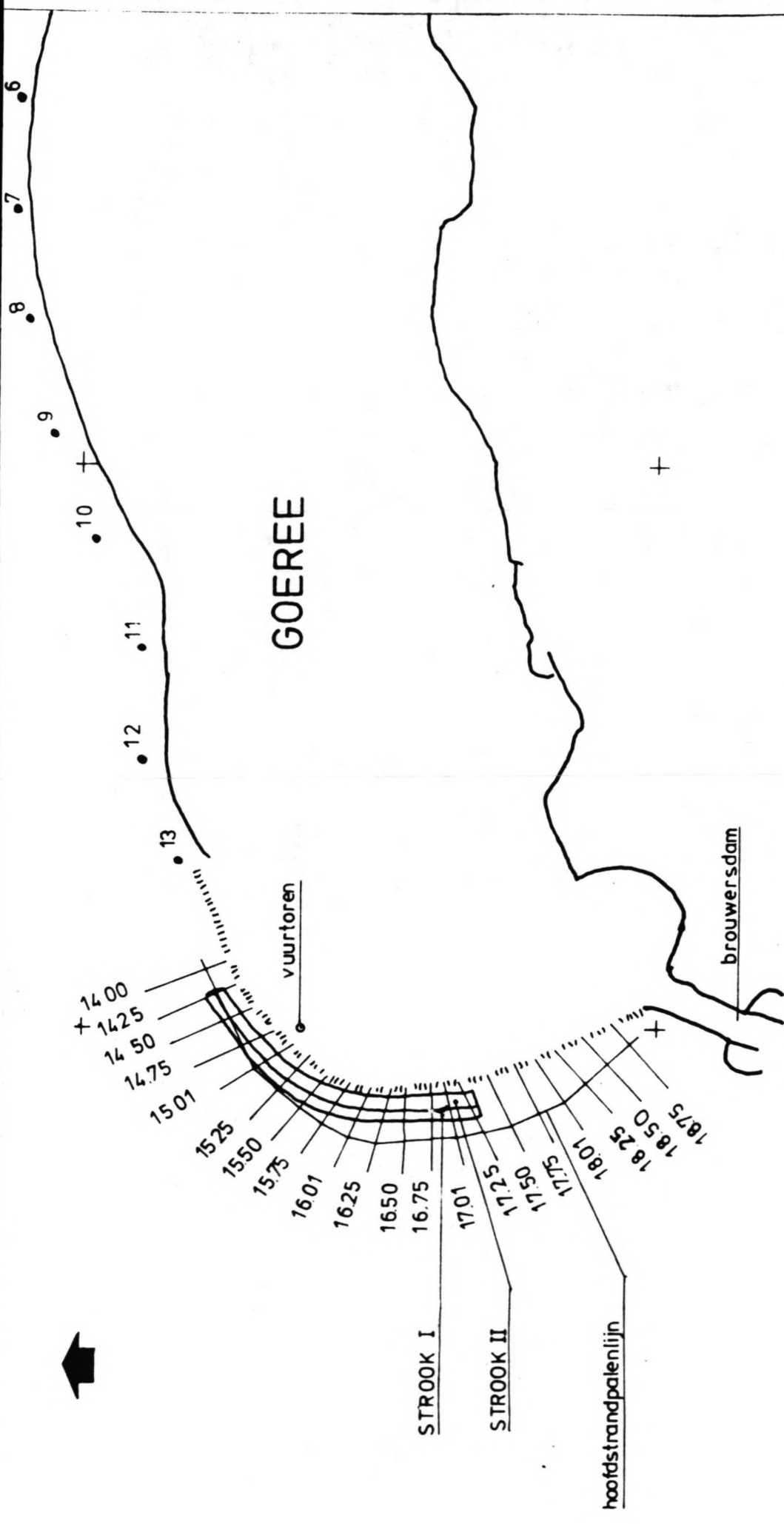
PEILEN IN DM BENEDENNAP



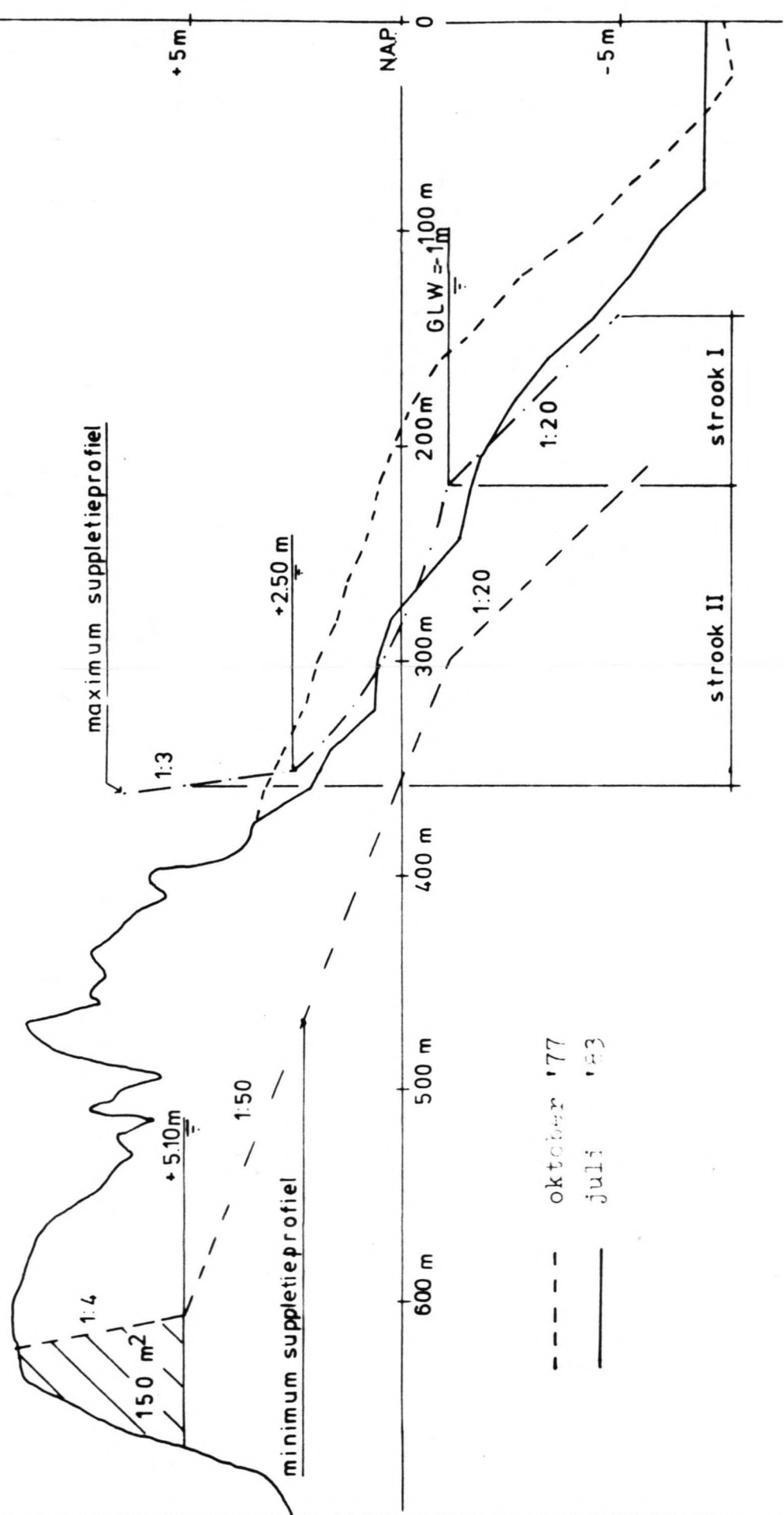
2 km

Geografisch Instituut - Rijks Universiteit Groningen  
Postbus 30.001 - 9700 RB Groningen

afdeling 12

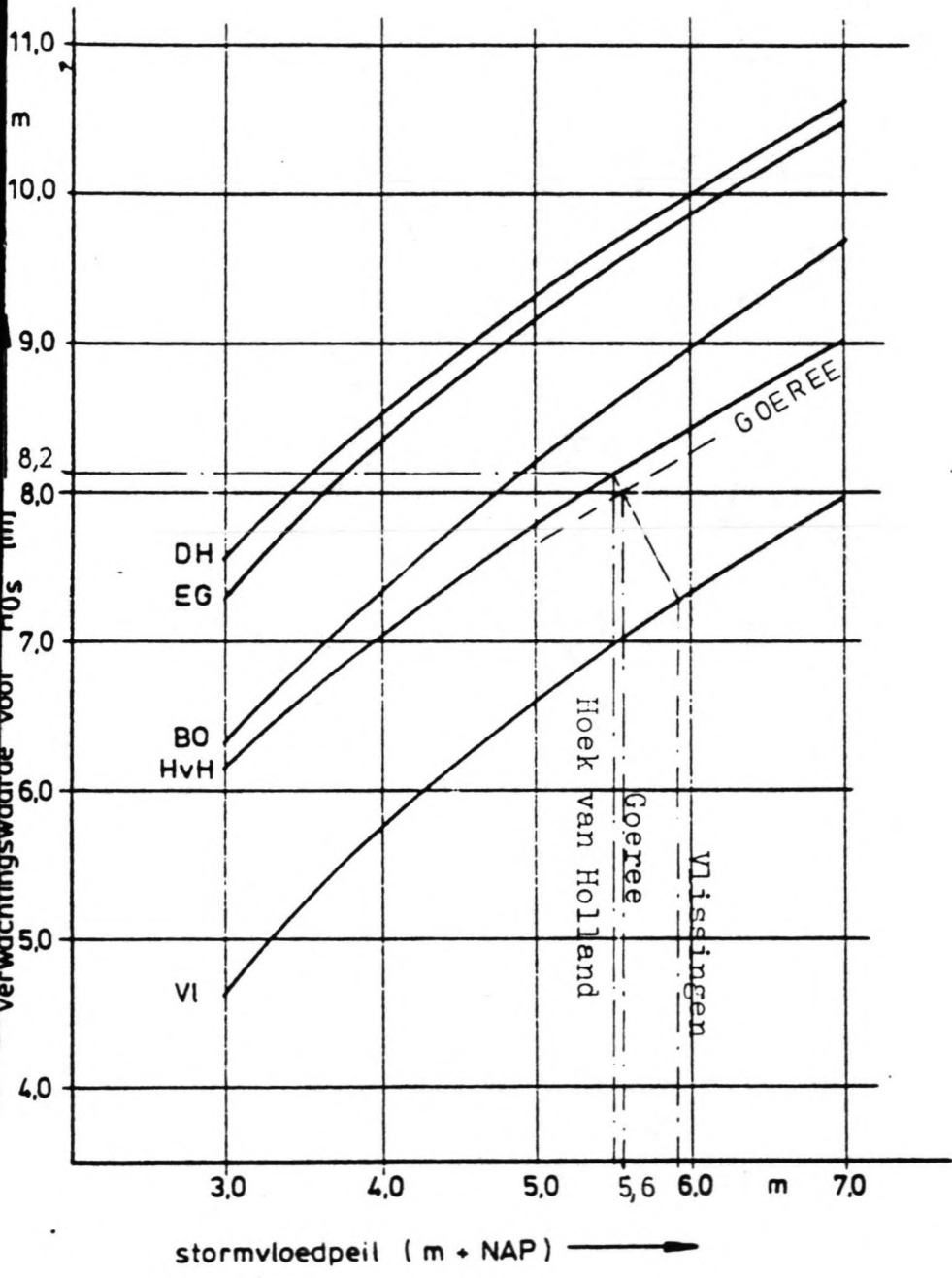
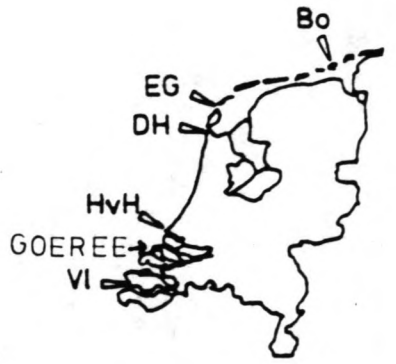


Indeling van de kust op de Kop van Goeree  
in stroken  
Schaal 1:50,000  
Figuur 15



- - - oktober '77  
 ————— juli '83

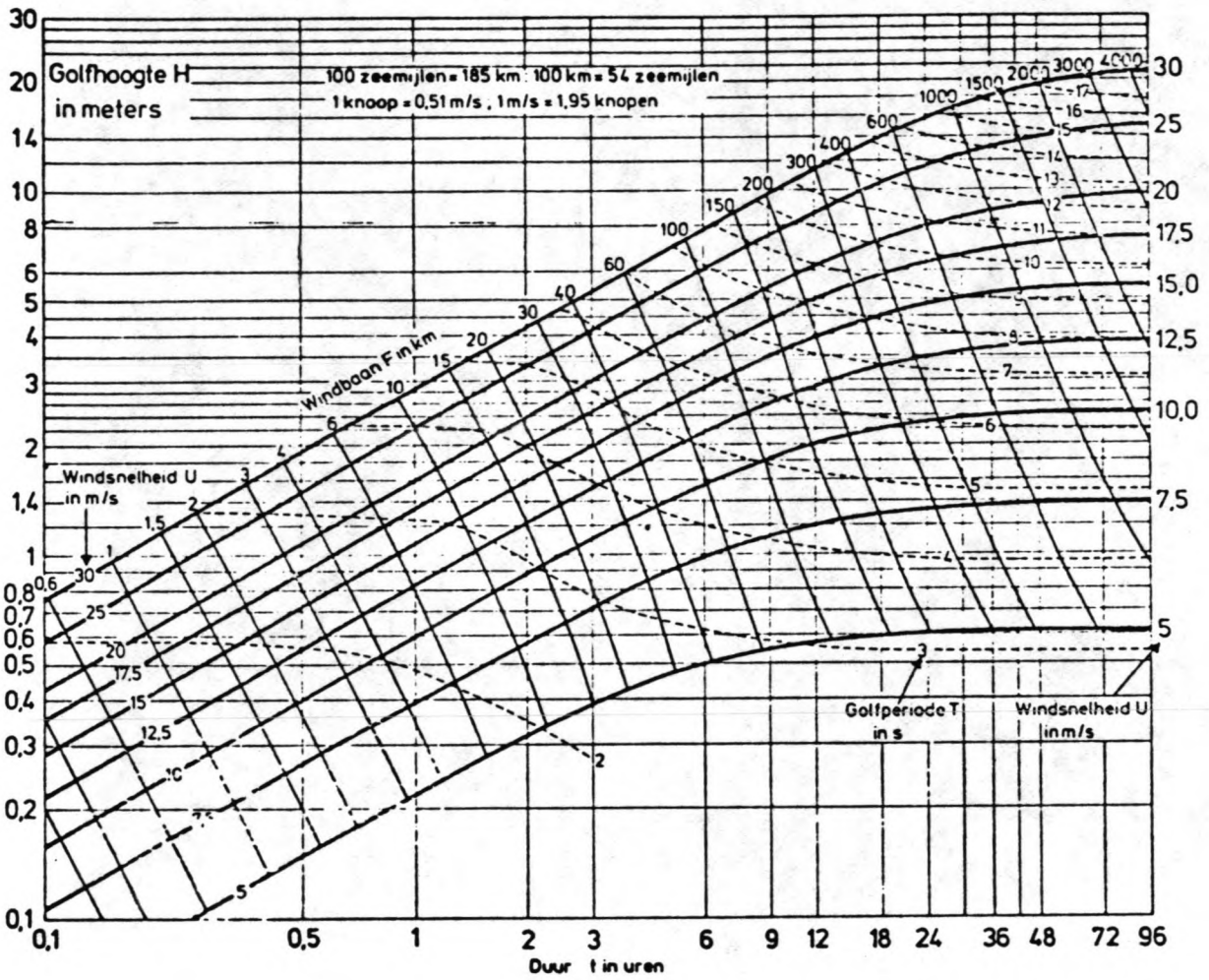
Grenzen van de kuststroken I en II in het dwarsprofiel van raai 16.01  
 Figuur 16



- DH = Den Helder
- EG = Eierlandsche gat
- Bo = Borkum
- VI = Vlissingen <sup>\*)</sup>
- HvH = Hoek van Holland
- <sup>\*)</sup> buiten het platengebied

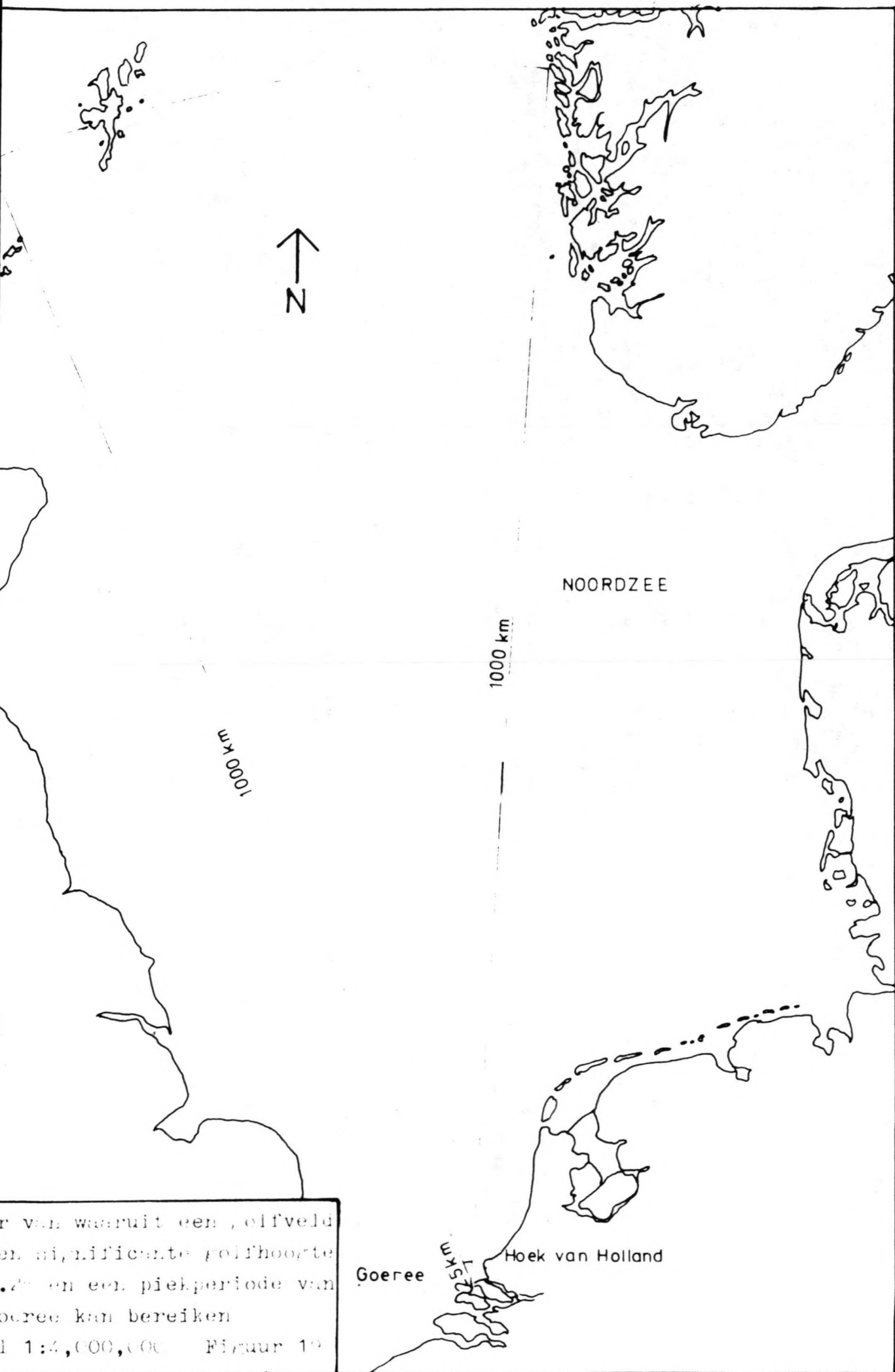
Verwachtingswaarde voor de golfhoogte als functie van het stormvloedpeil

Figuur 17

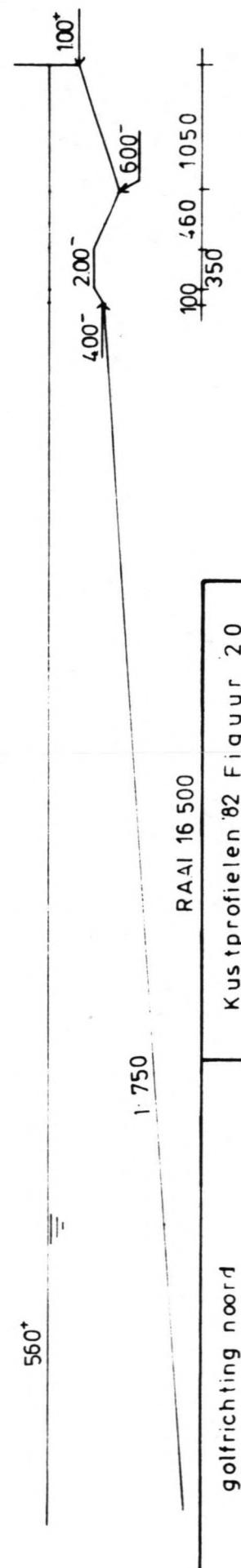
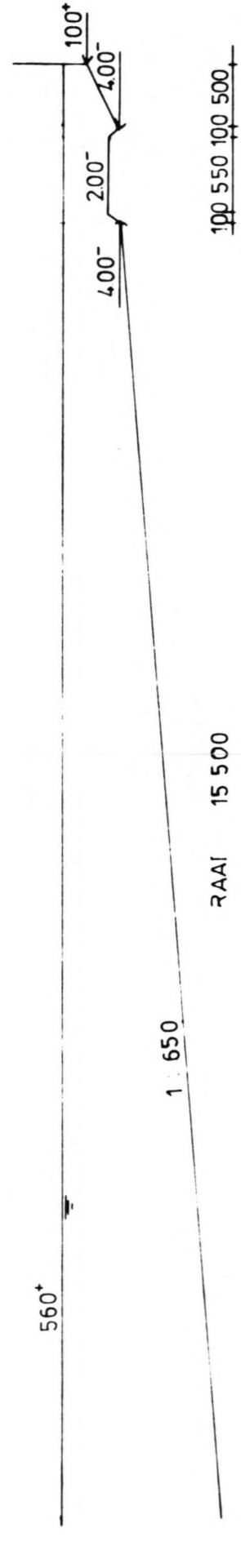
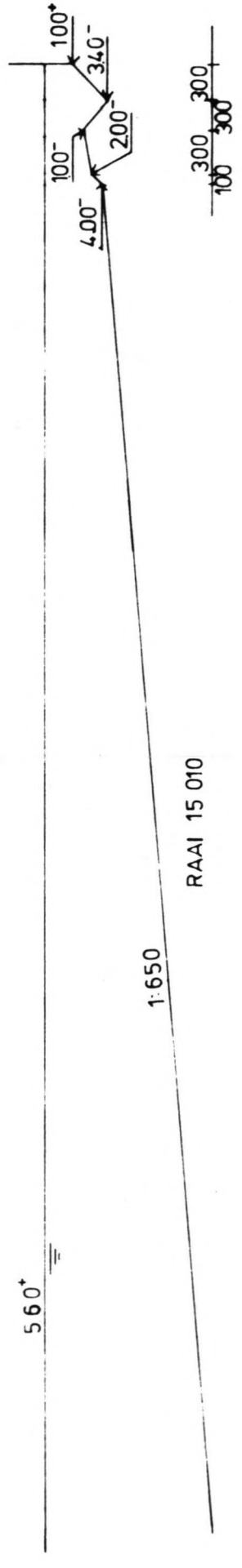
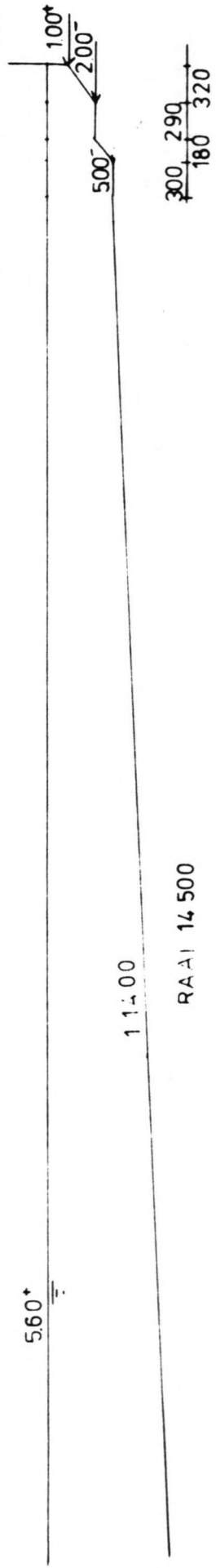


Grafiek ter bepaling van de significante golfhoogte H en golfperiode T in zeevang uit de windsnelheid U en de duur t of de windbaan F. (uit Zeegolven van Groen en Dorrestein)

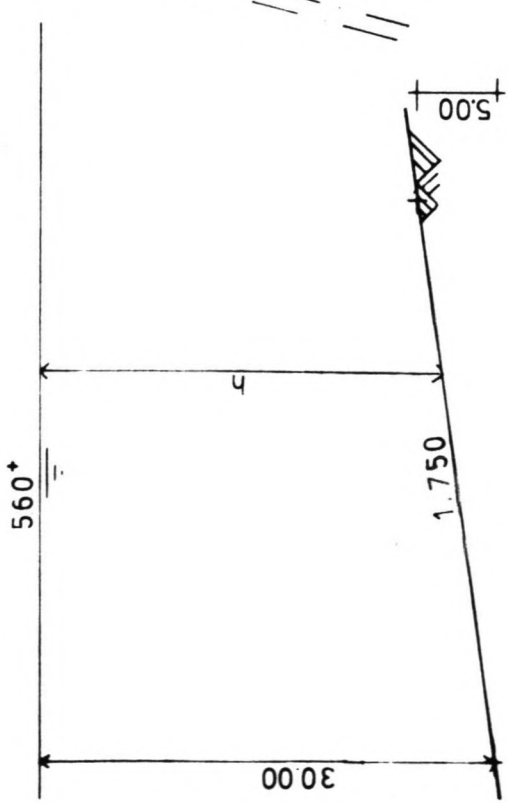
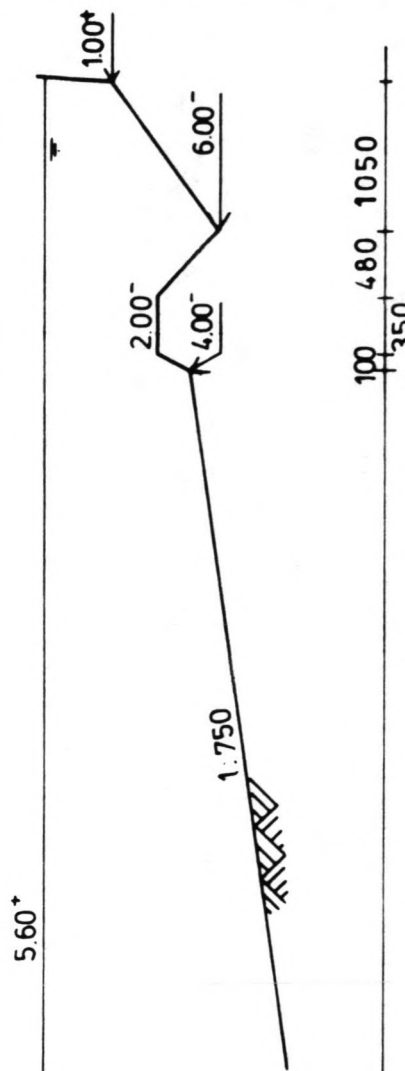
Figuur 18





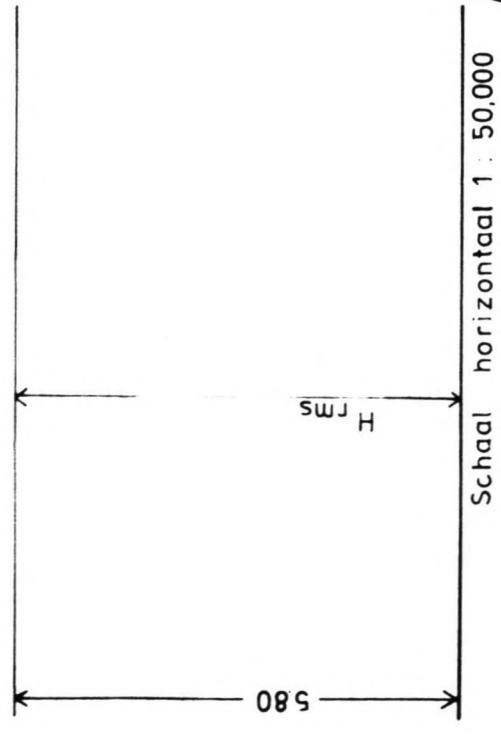
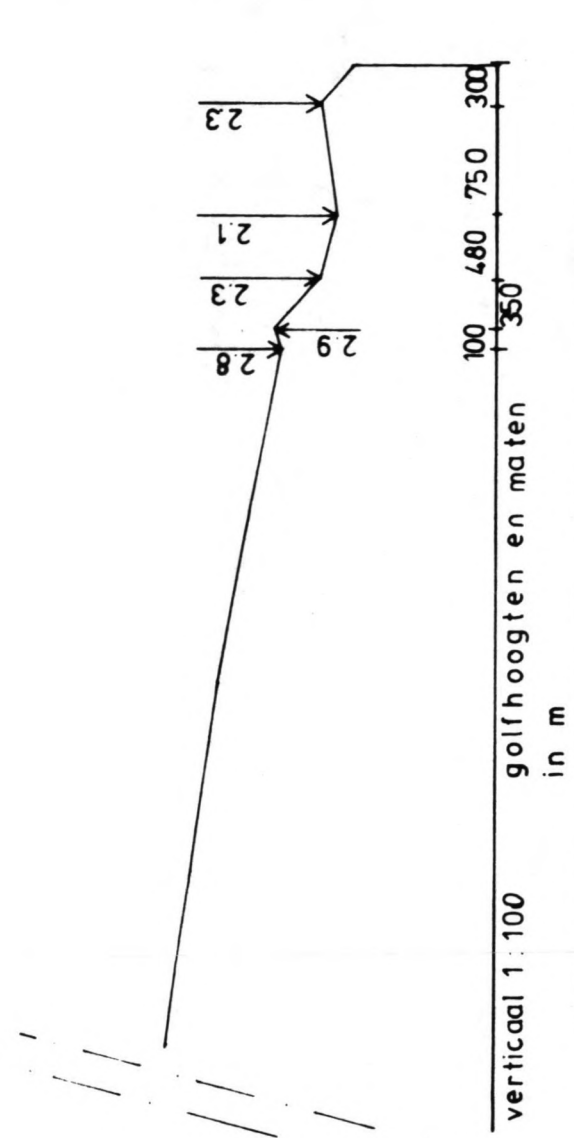
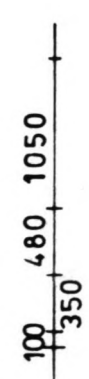


golfrichting noord maten in m      peilen in m NAP	Kus tprofielen '82 Figuur 20 Schaal hor. 1:50.000      vert. 1:1.000
---	---



$\pm dx$  waarbij  $H_{rms}$  constant 5.80m is.

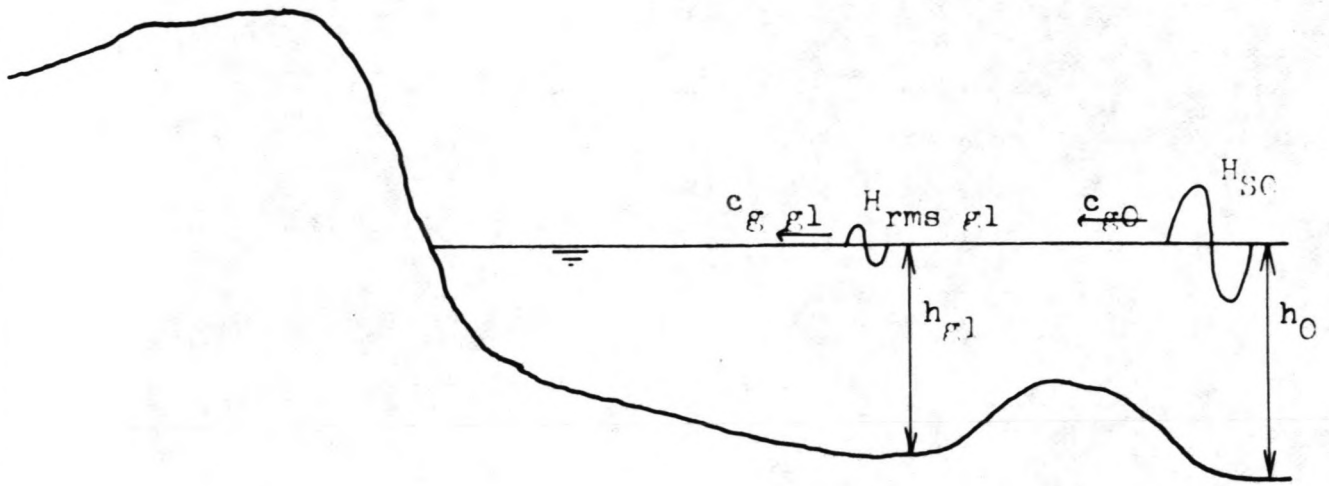
Schaal horizontaal 1 : 50.000  
 verticaal 1 : 500  
 Peilen in m tov NAP  
 maten in m



Schaal horizontaal 1 : 50.000  
 verticaal 1 : 100  
 golfhoogten en maten  
 in m

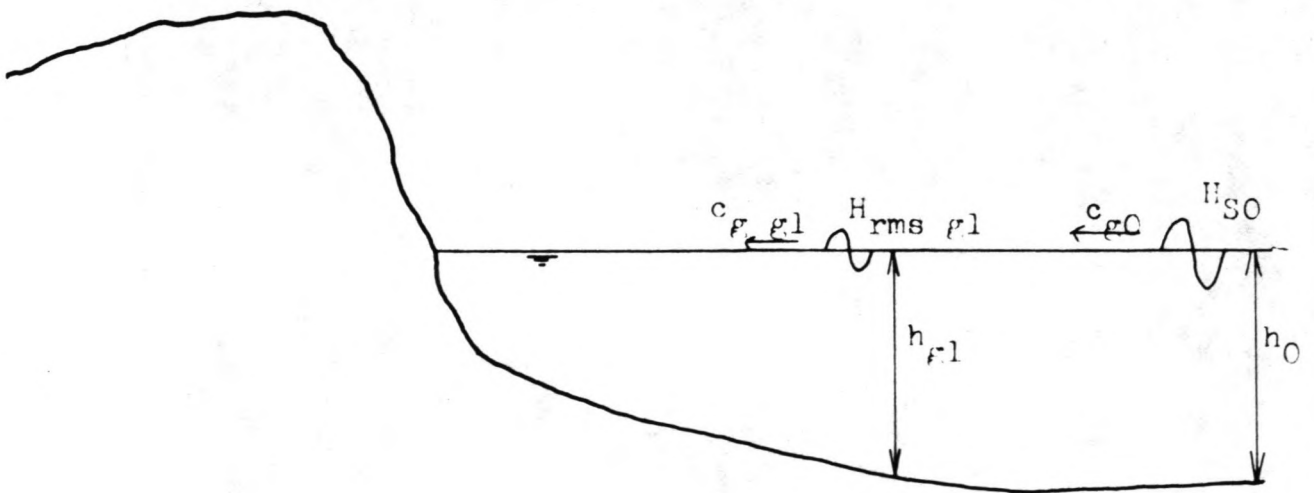
Verloop van de waterdiepte  $h$  en de golfhoogte  $H_{rms}$   
 bij golfaanval uit het noorden in raai 16.50

Figuur 21



$H_{rms, g1}$  volgt met de dissipatieberekening volgens Battjes, Janssen uit  $H_{S0}$  in het profiel met bank.

$H_{S0}$  = significante golfhoogte op diep water (m)



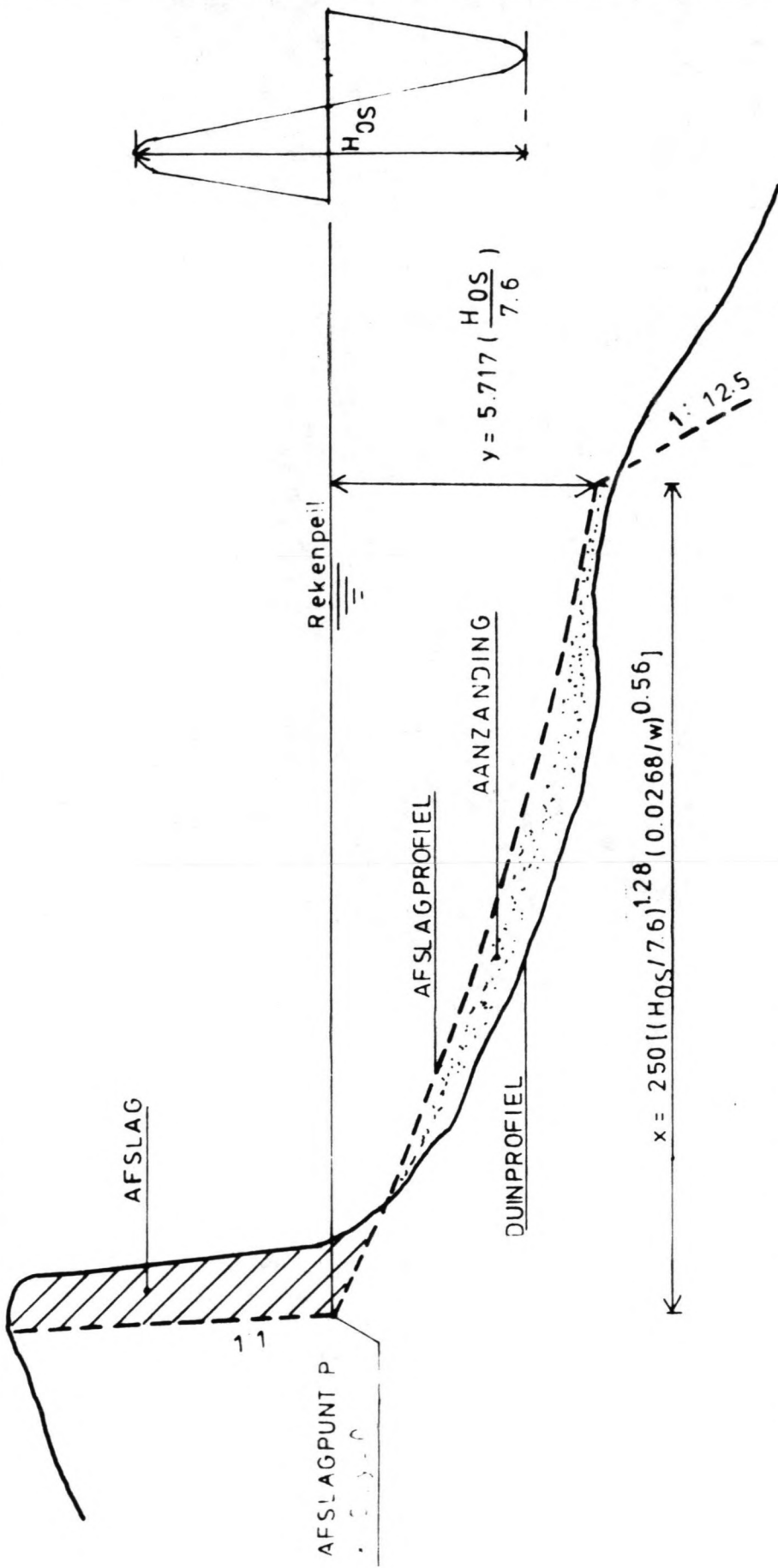
$H_{S0}$  in het profiel zonder bank volgt uit

$H_{rms, g1}$  met;

$$H_{S0} = \sqrt{\frac{2 \cdot c_g}{c_{g0}}} \cdot H_{rms, g1} \quad (3.5.15)$$

$H_{S0}$  = rekenwaarde van de golfhoogte (m) in het profiel zonder bank

Vertaling van de situatie met bank en geul naar de situatie zonder bank en geul

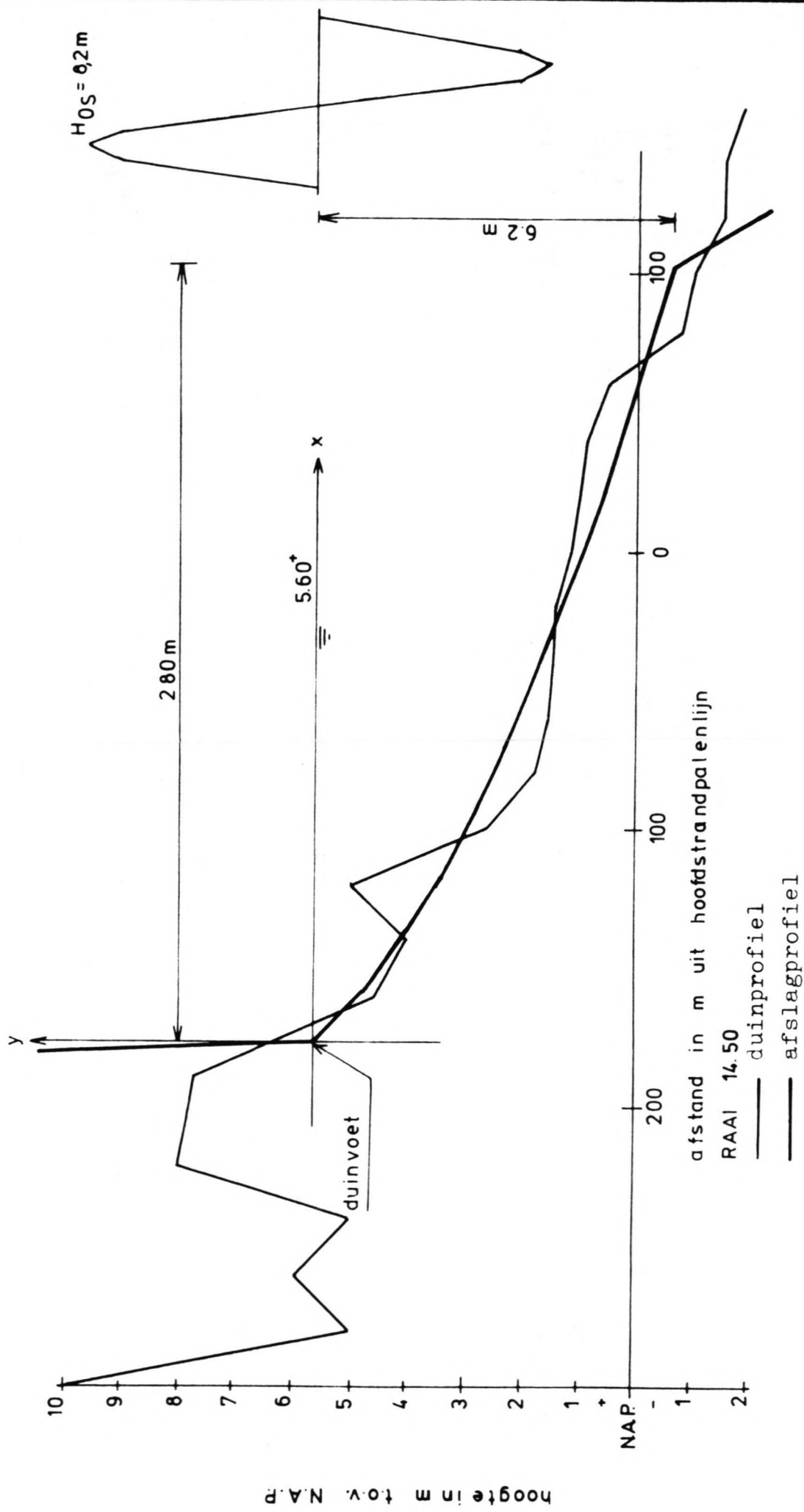


afslagprofiel schuift landwaarts tot afslag = aanzanding

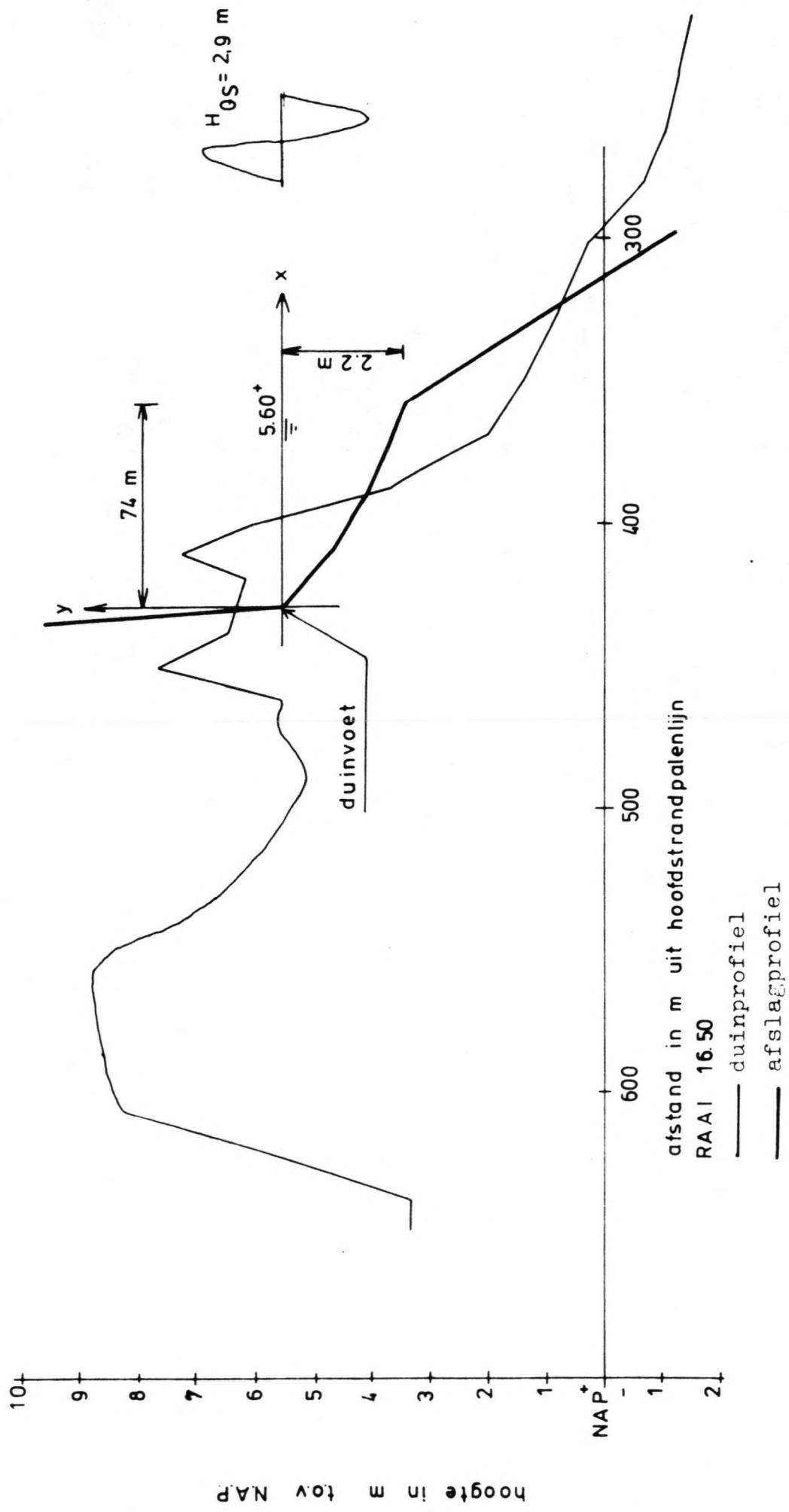
$$\text{afslagprofiel} \cdot (76/H_{0S}) y = 0.4714 [(76/H_{0S})^{1.28} (w/0.0268)^{0.56} x + 18]^{0.5} - 2.00$$

$H_{0S}$  is de rekenwaarde voor de golfhoogte in diep water,  $w$  is de rekenwaarde voor de valsnelheid van zand in water  
 $H_{0S}$ ,  $x$  en  $y$  in m,  $w$  in m/s

Defenitieschets van het  
 afslagprofiel  
 Figuur 23



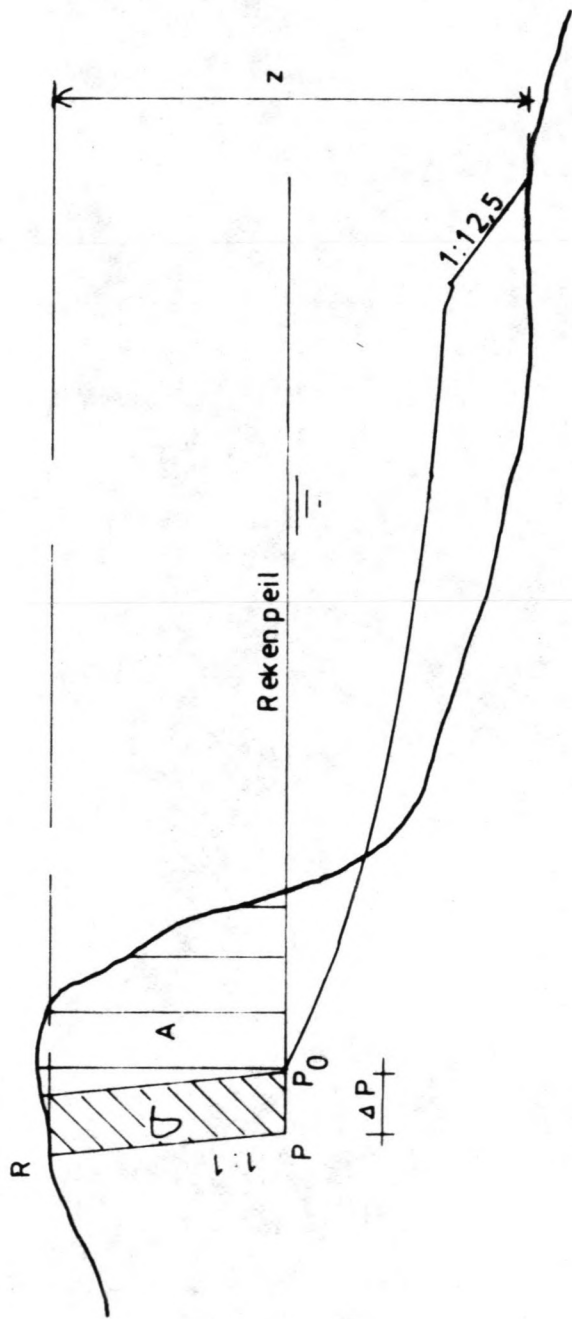
Afslagprofiel in het duinprofiel van raai 14.50 (juli '83)



Afslagprofiel in het duinprofiel van raai 16.50 (juli '83)

Figuur 25





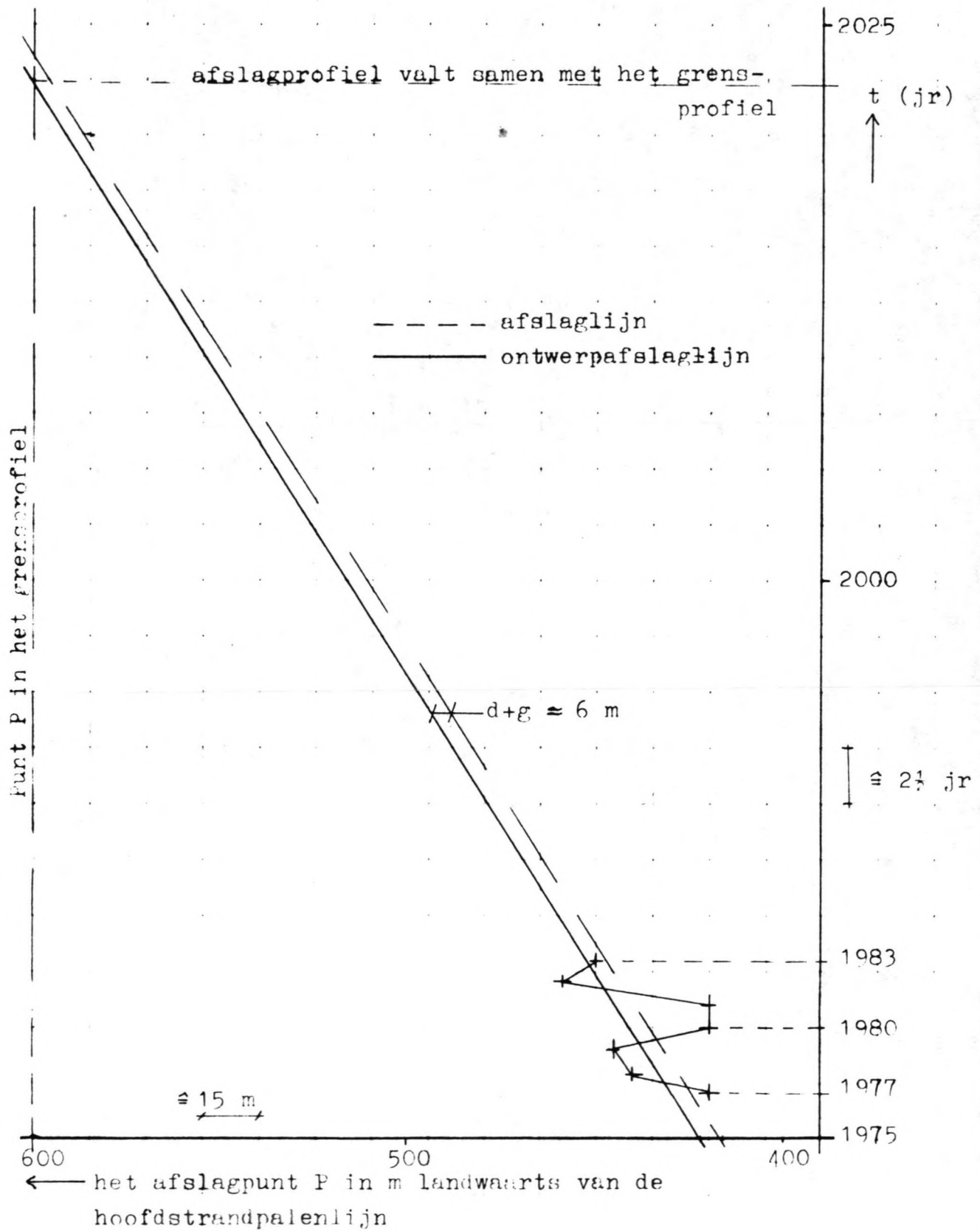
A is de berekende duinafslag boven rekenpeil in  $m^3/m$

$\sigma$  is de toeslag op A in  $m^3/m$  voor - stormvloedduur

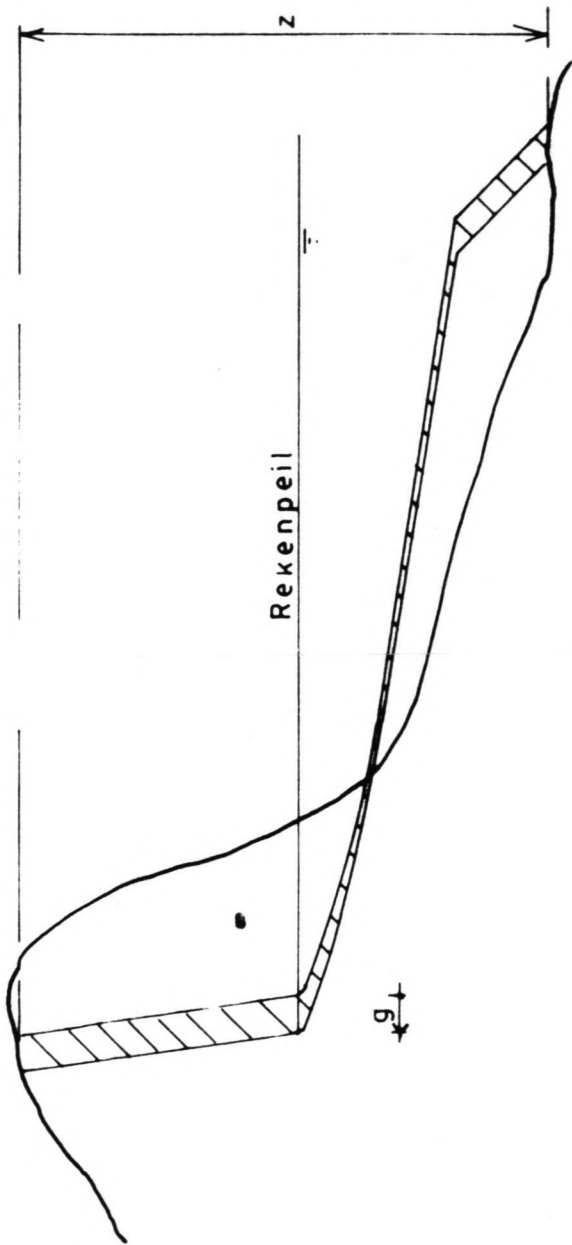
- buistoten en-oscillaties
- nauwkeurigheid rekenmodel

$\Delta P$  is de extra achteruitgang van als gevolg van  $\sigma$  in m

Definitieschets voor de toeslag  
op de berekende duinafslag



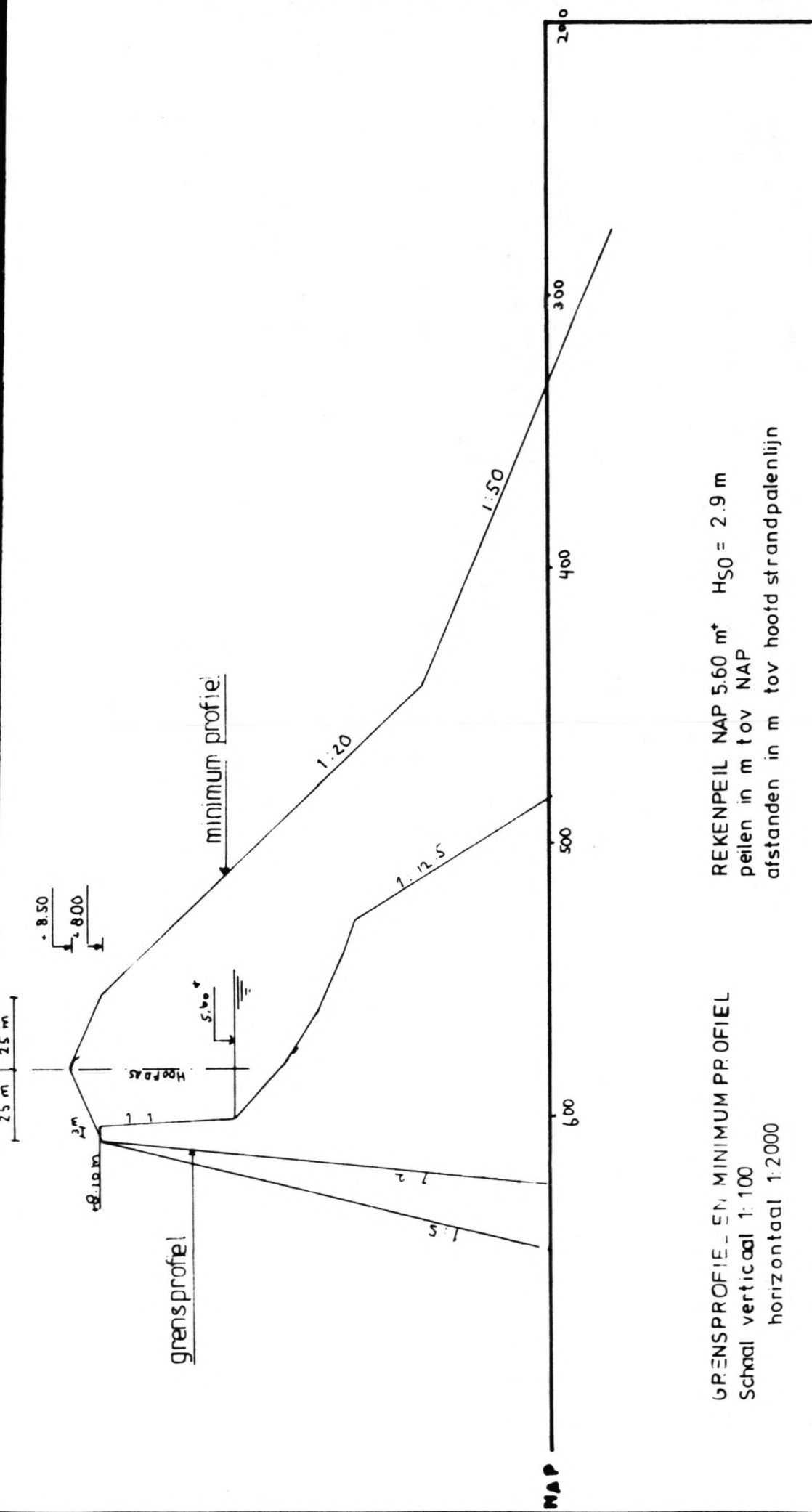
Ontwerpafslaglijn raai 16.50  
 Figuur 27



$\xi$  = extra achteruitgang in m van het afslagprofiel  
 t.g.v. een gradiënt in het langstransport

het gearceerde oppervlak ( $m^2$ ) is gelijk aan  
 het verschil in langstransport  $G$  ( $m^3$ ) per  
 strekkende meter kustlijn

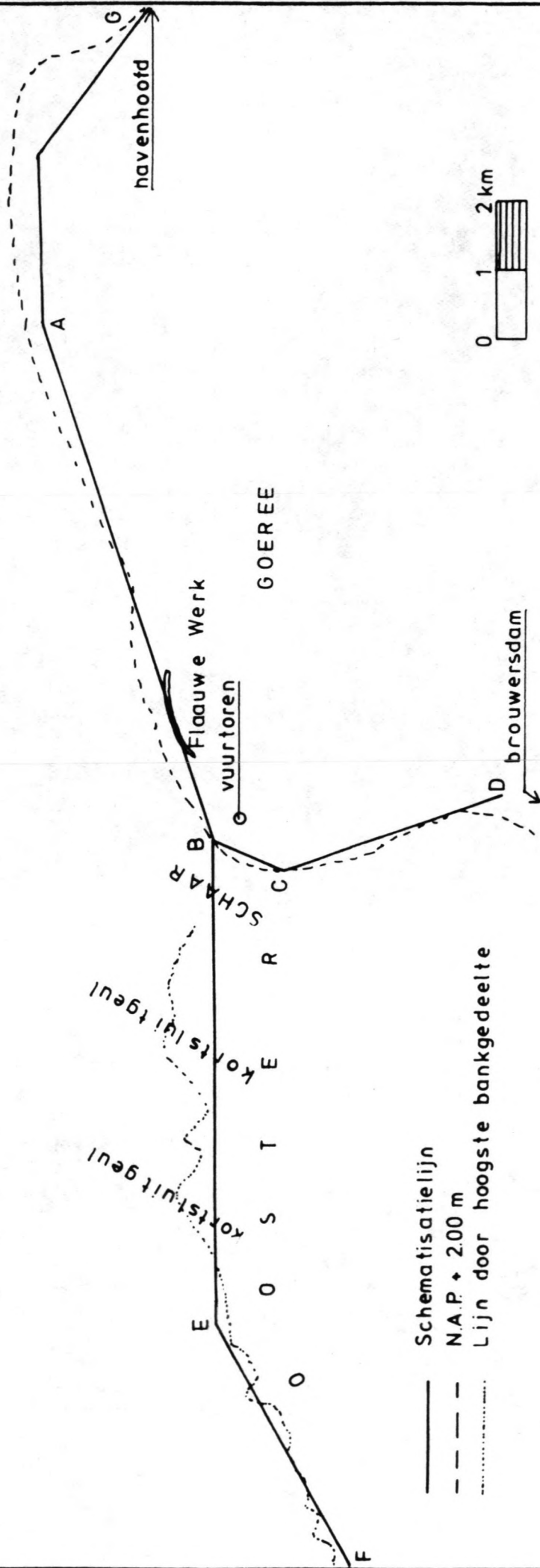
$$G = \xi \cdot z$$



GRENSPROFIELE EN MINIMUMPROFIEEL  
 Schaal verticaal 1:100  
 horizontaal 1:2000

REKENPEIL NAP 5.60 m\*  $H_{50} = 2.9$  m  
 peilen in m tov NAP  
 afstanden in m tov hoofd strandpalenlijn

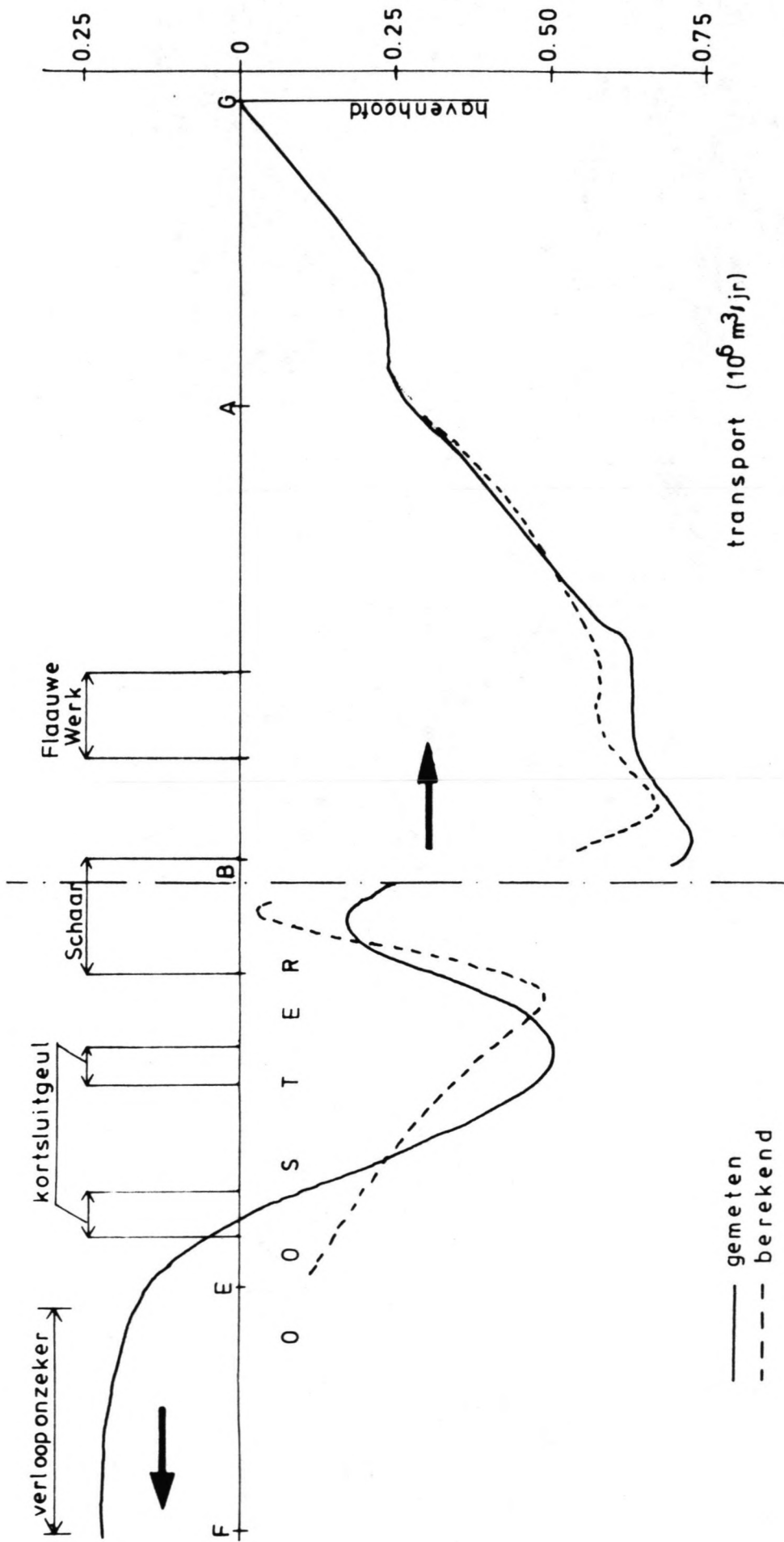
Defenitieschets grensprofiel en  
 minimumprofiel raai 16.50  
 Figuur 29



- Schematisatielijijn
- - - N.A.P. + 2.00 m
- ..... Lijn door hoogste bankgedeelte

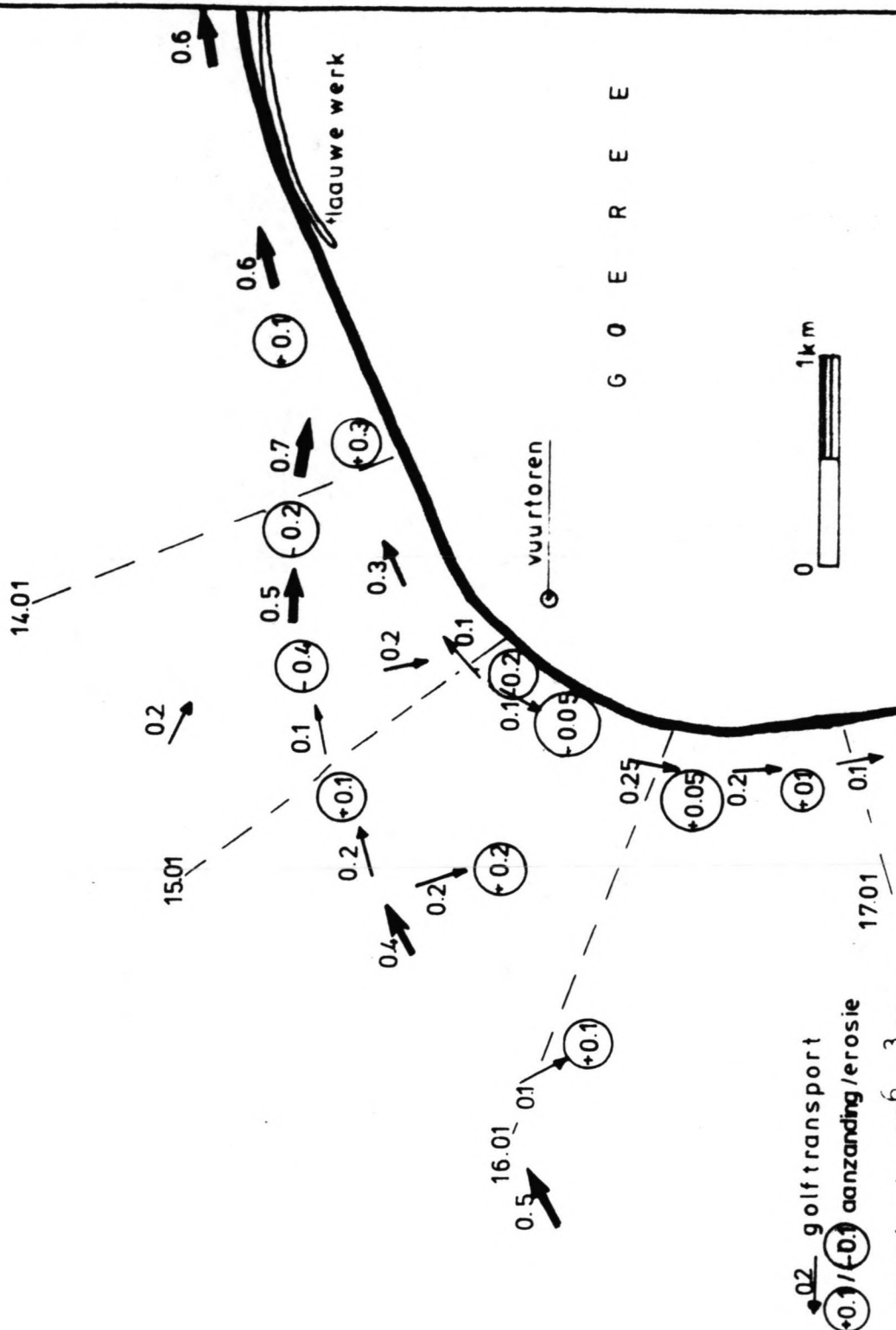


Geschematiseerde kustlijn van Goeree en  
kruinlijn over de Zandhuk de Ooster  
volgens Svasek  
Figuur 30



Gemeten zandtransporten en berekende  
golftransporten langs de kust van  
Goeree en de zandbank de Ooster  
volgens Svasek      Figuur 31

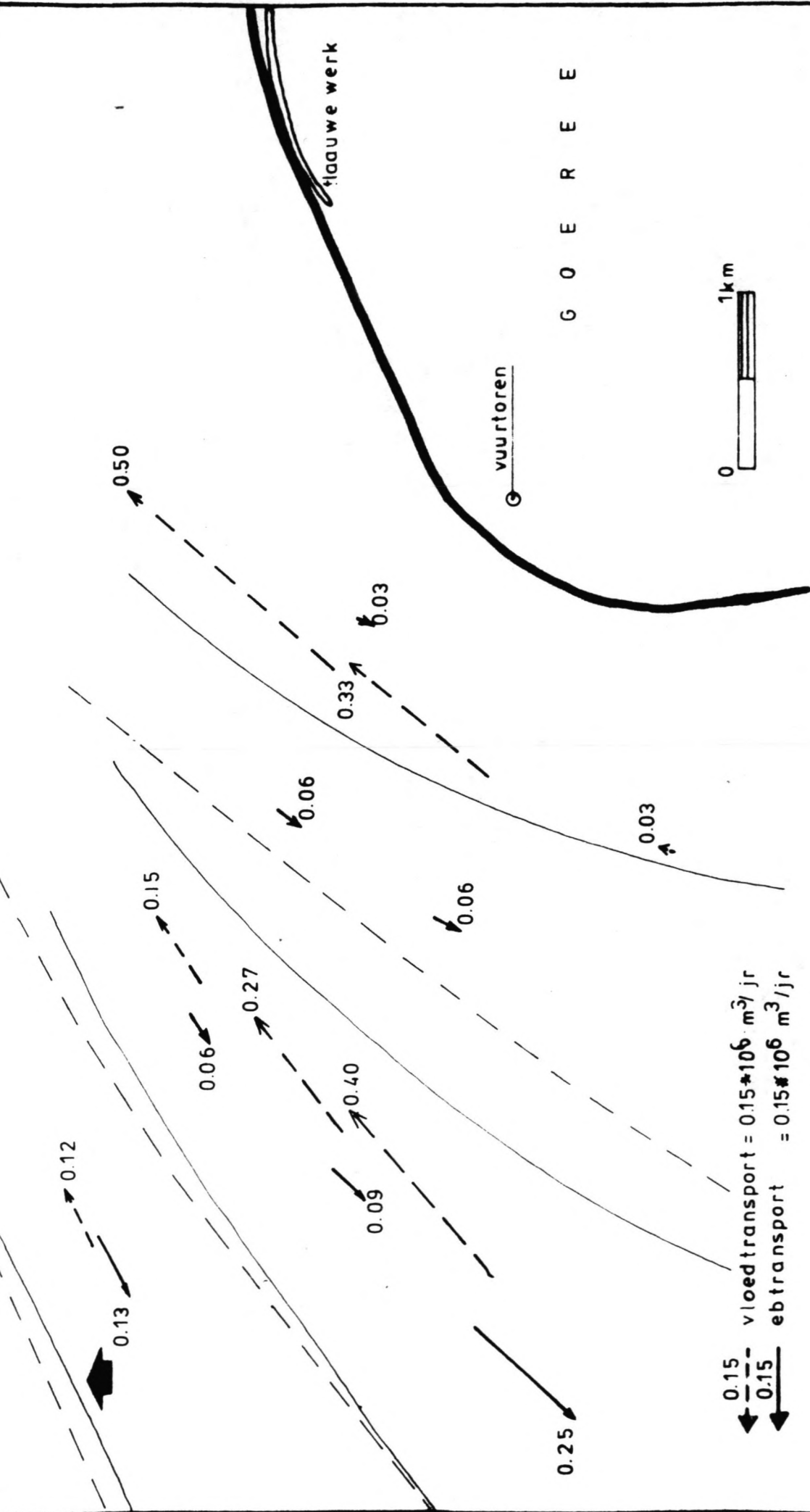




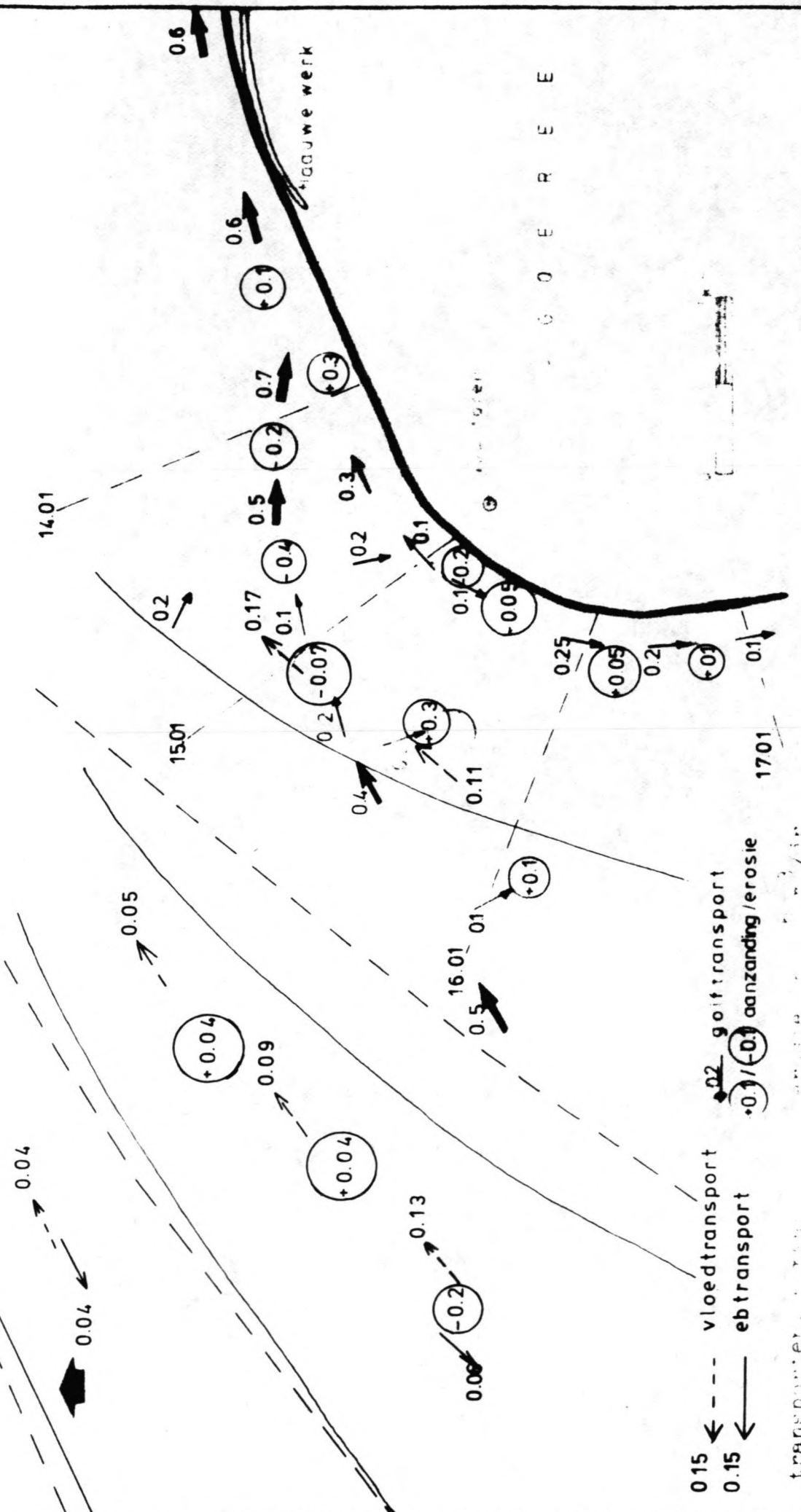
↳ 0.2 golftransport  
 (+0.1) / (-0.1) aanzanding / erosie

transporten, aanzanding of erosie in  $10^6 \text{ m}^3/\text{jr}$

Door Svasek berekende golftransporten met gebieden van aanzanding en erosie in het kustgebied van Goeree Figuur 32



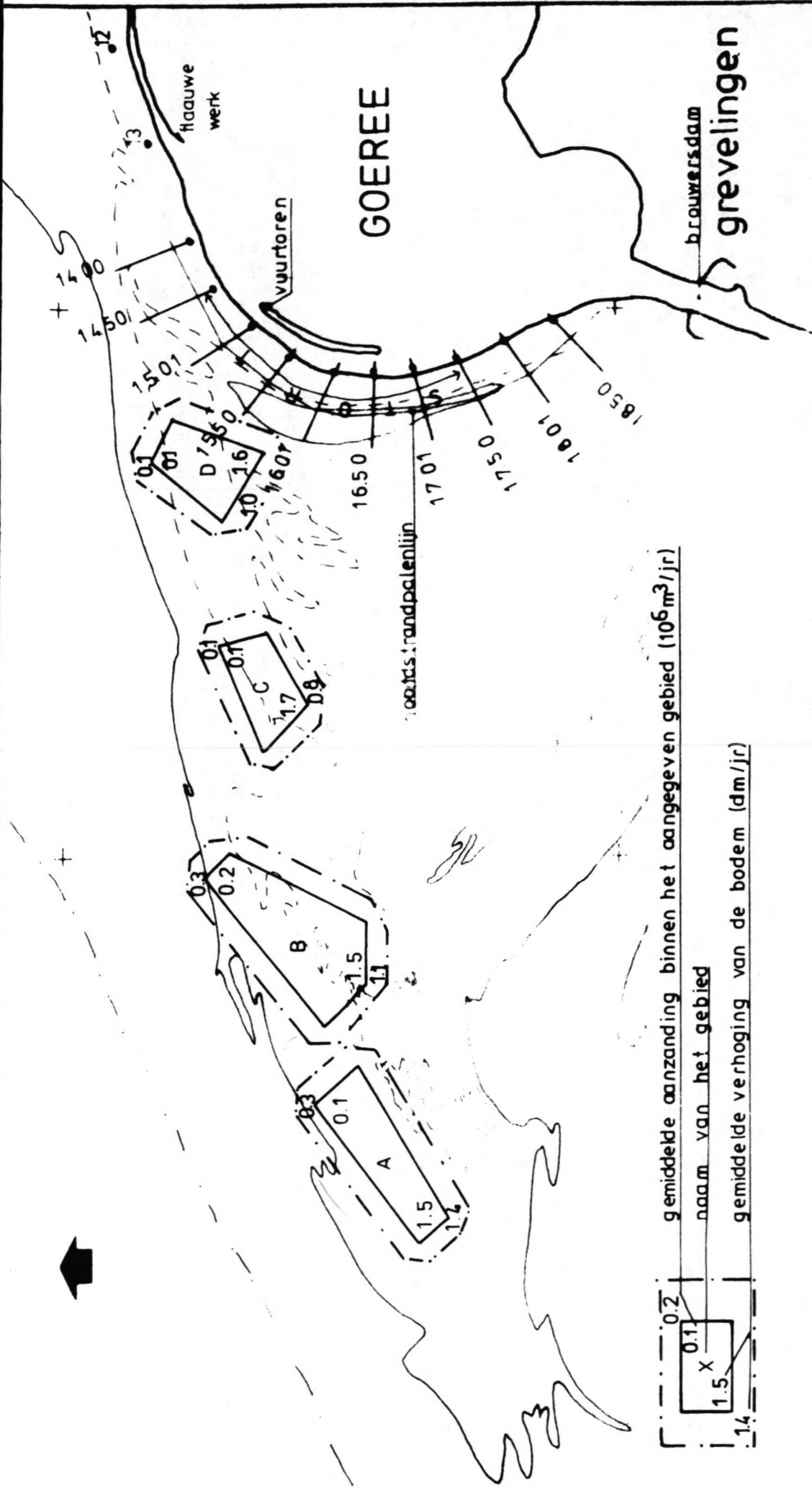
Door Bakker en Speekenbrink berekende  
 getijtransporten (zonder correctie-  
 factor) in het kustgebied van Goeree



015 ← - - - vloedtransport  
 0.15 ← ——— ebtransport  
 0.02 golfttransport  
 +0.1/-0.1 aanzanding/erosie

transporter...

Berekende golftransporten (Svasek) en berekende getijtransporten  
 inclusief correctiefactor (Bakker en Speekenbrink) met gebieden  
 van aanzanding en erosie in het kustgebied van Goeree Figuur 34

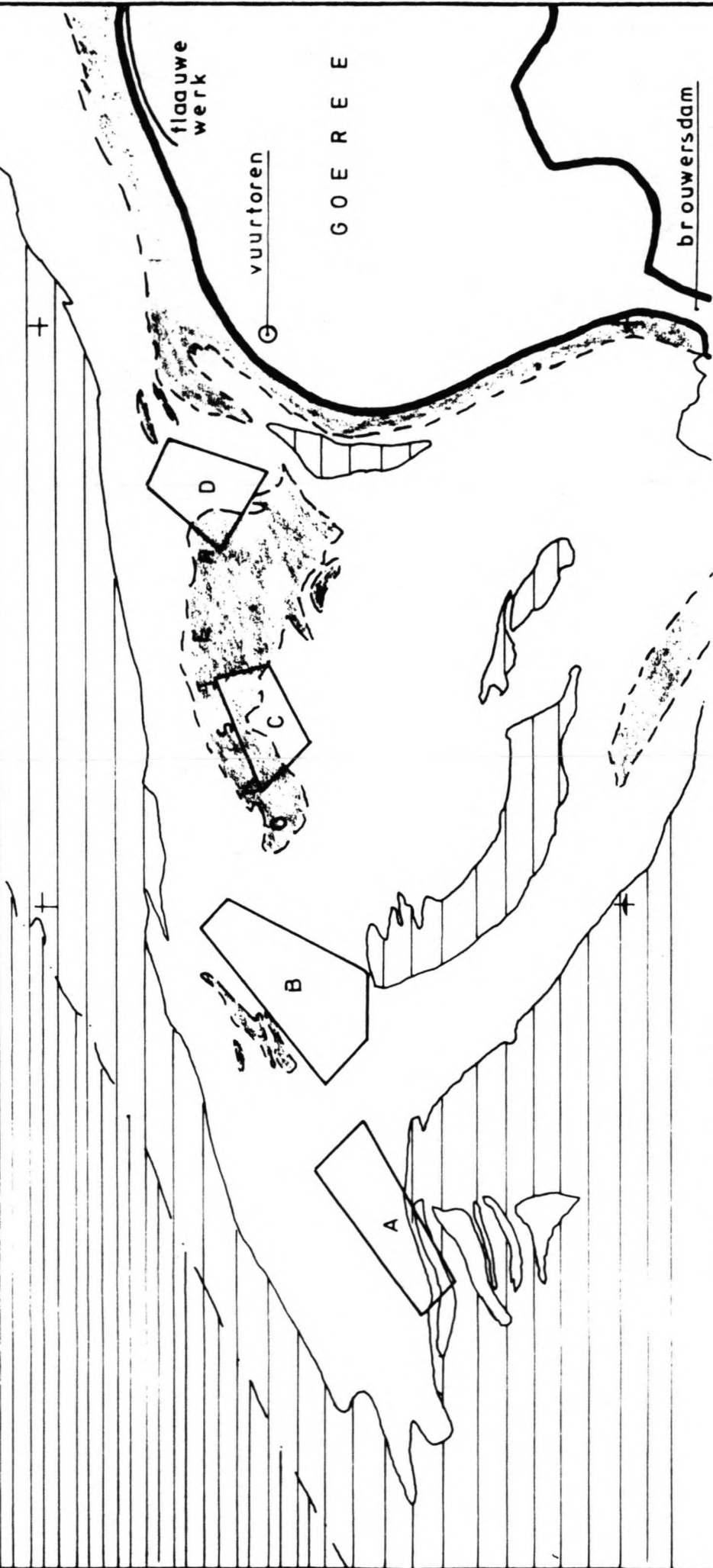


0.2 | gemiddelde aanzanding binnen het aangegeven gebied ( $10^6 \text{ m}^3/\text{jr}$ )  
 0.1 | naam van het gebied  
 1.5 | gemiddelde verhoging van de bodem (dm/jr)  
 1.4

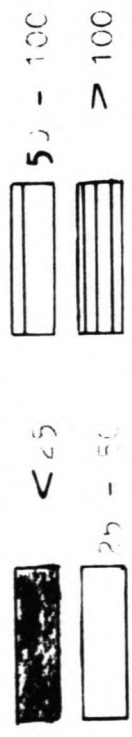
- NAP -2.50 m
- NAP -5.00 m
- NAP 10.00 m

Gemiddelde jaarlijkse aanzanding in de wingebieden  
 Gemeten over de periode 1970 - 1980  
 Schaal 1:50,000

1972



Diepte in dm -NAP

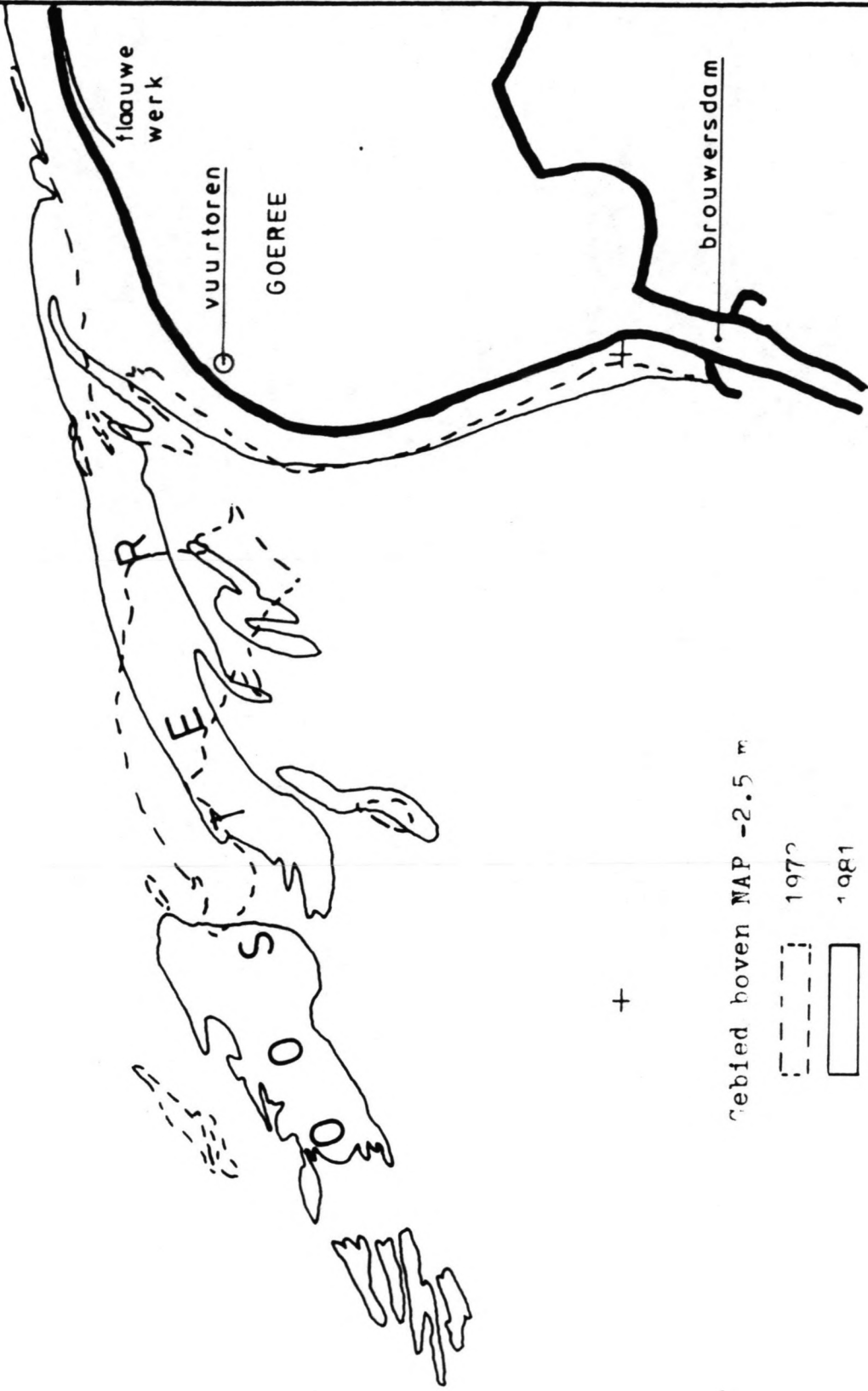


Aenzendingsgebieden en de  
bodemligging in 1972  
Schaal 1:50,000 Figuur 36

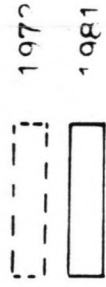


+

+



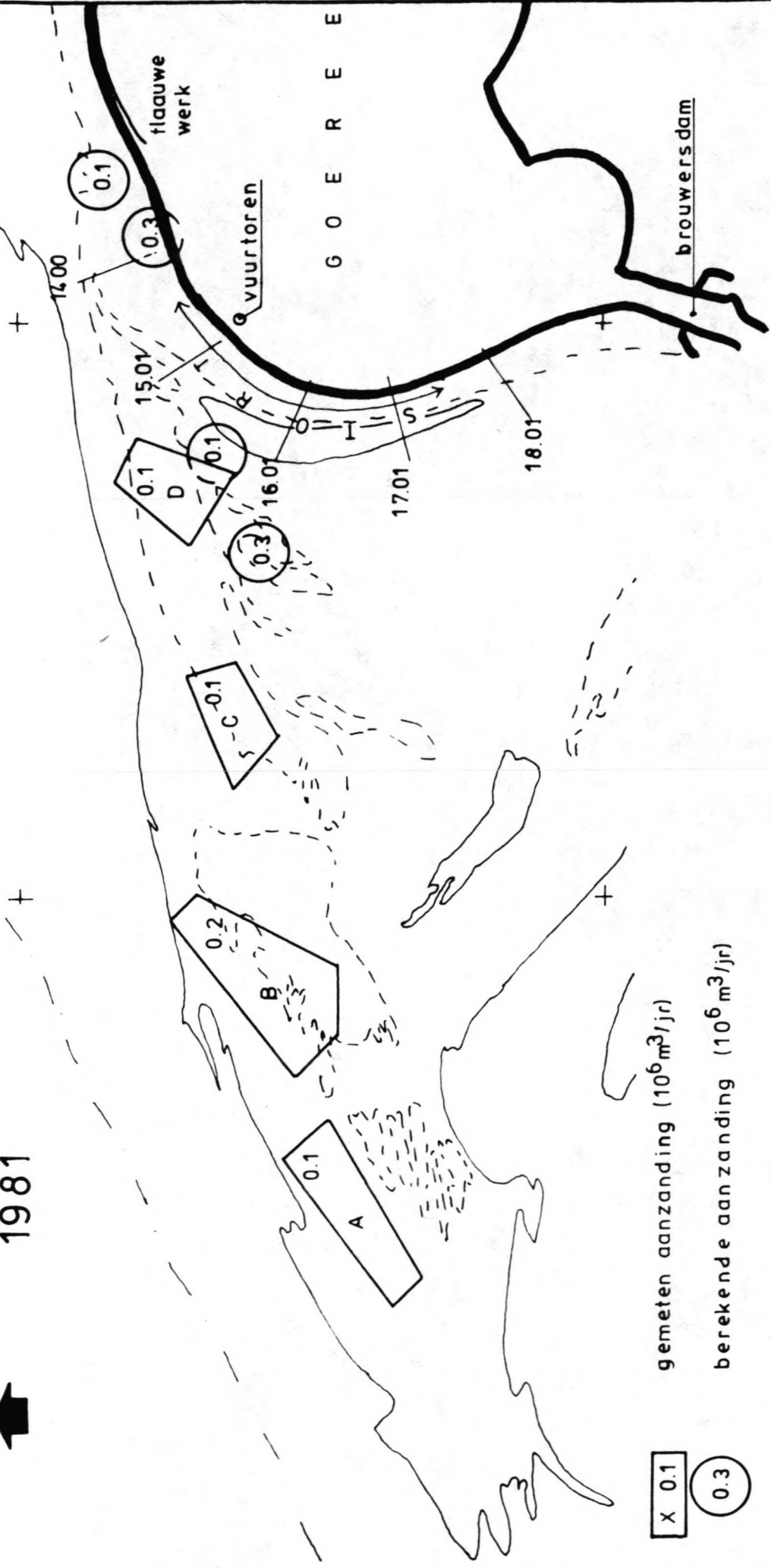
Gebied boven NAP -2.5 m



Ontwikkeling van de zandbank de  
 Ooster in de periode '72 - '81  
 Schaal 1:50,000      Figuur 37



1981



X 0.1

○ 0.3

gemeten aanzanding ( $10^6 \text{ m}^3/\text{jr}$ )

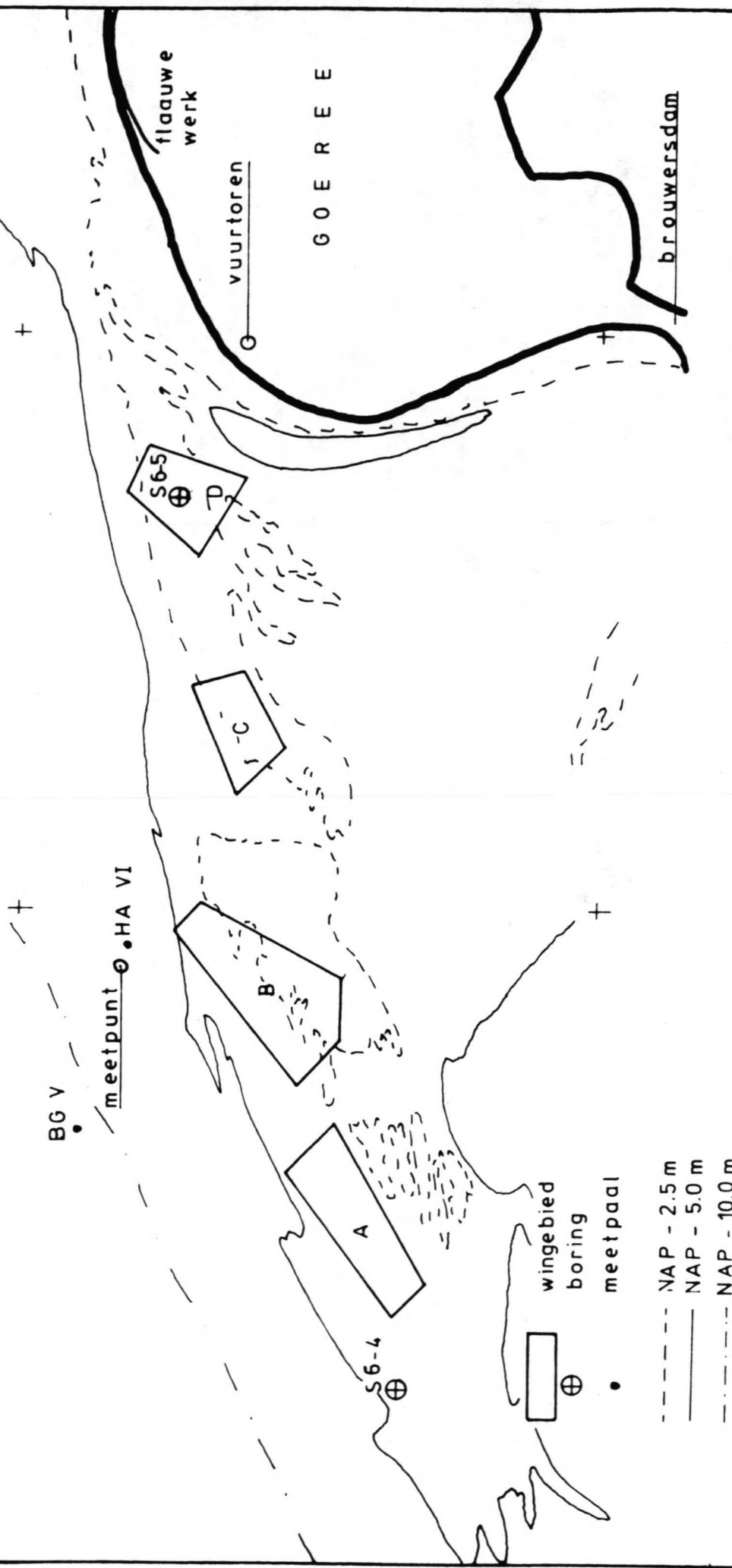
berekende aanzanding ( $10^6 \text{ m}^3/\text{jr}$ )

- NAP - 2.0
- NAP - 5.0
- - - - NAP - 10.0

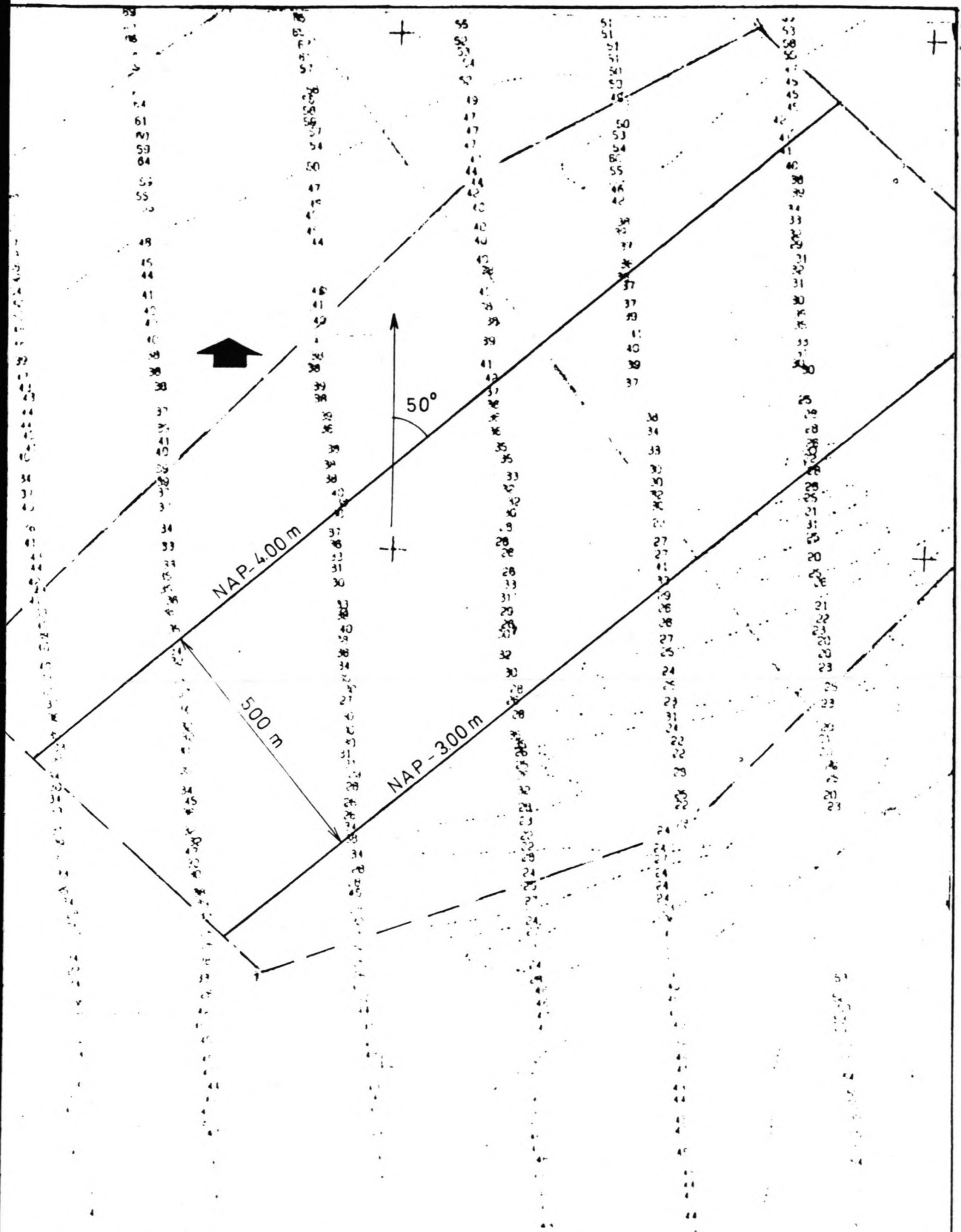
Gemeten en berekende aanzanding  
 in het kustgebied van Goeree  
 Schaal 1:50,000      Figuur 38



1981



Ligging wingebieden, boringen en meetpalen  
Schaal 1:50,000  
Figuur 39

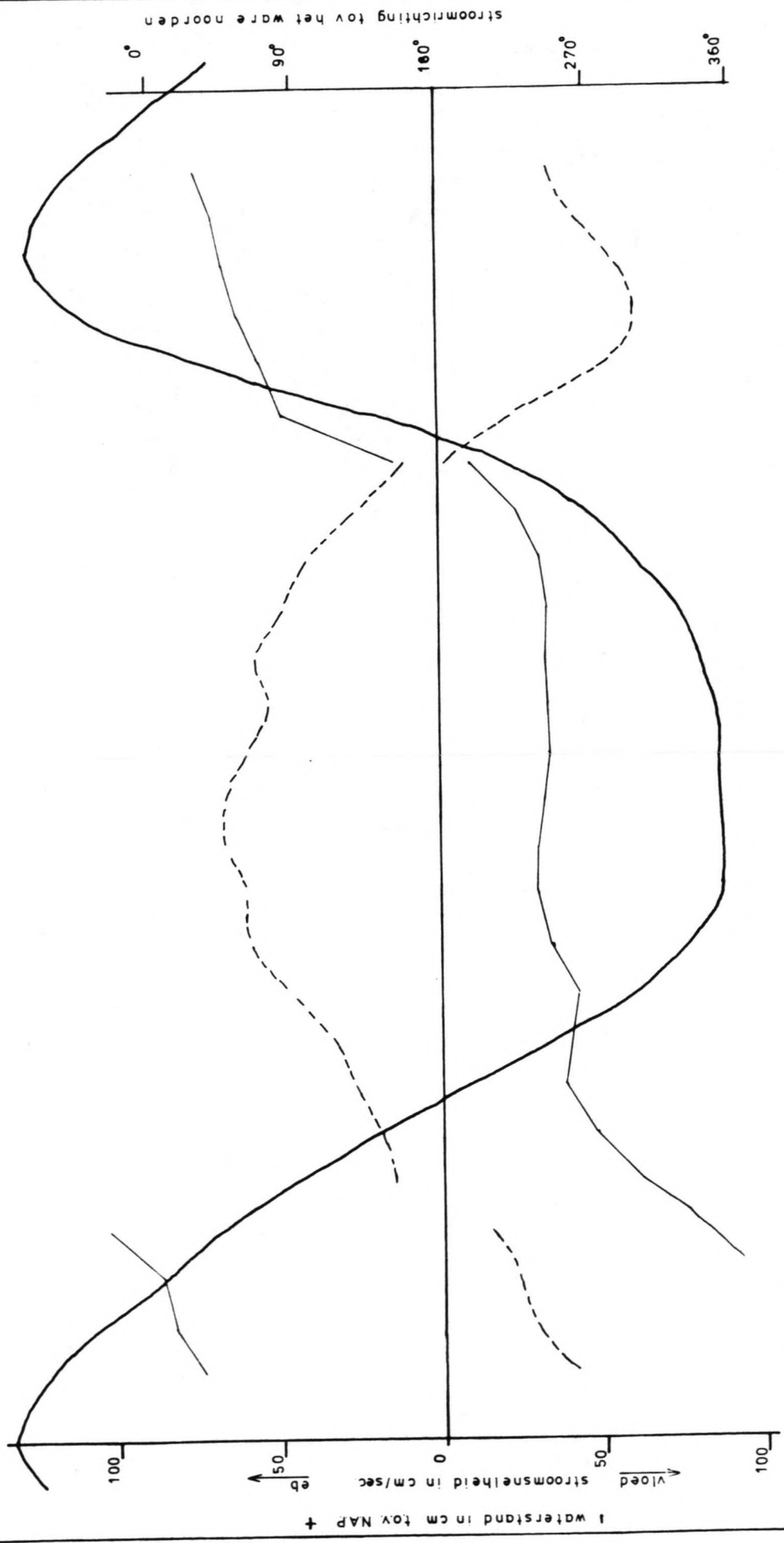


lodingen in dm beneden NAP  
 - - - - - grens wingebied A  
 ————— geschematiseerde  
 dieptelijn

Lodingen wingebied A (1980) met  
 geschematiseerde dieptelijnen  
 Schaal 1:10,000      Figuur 40

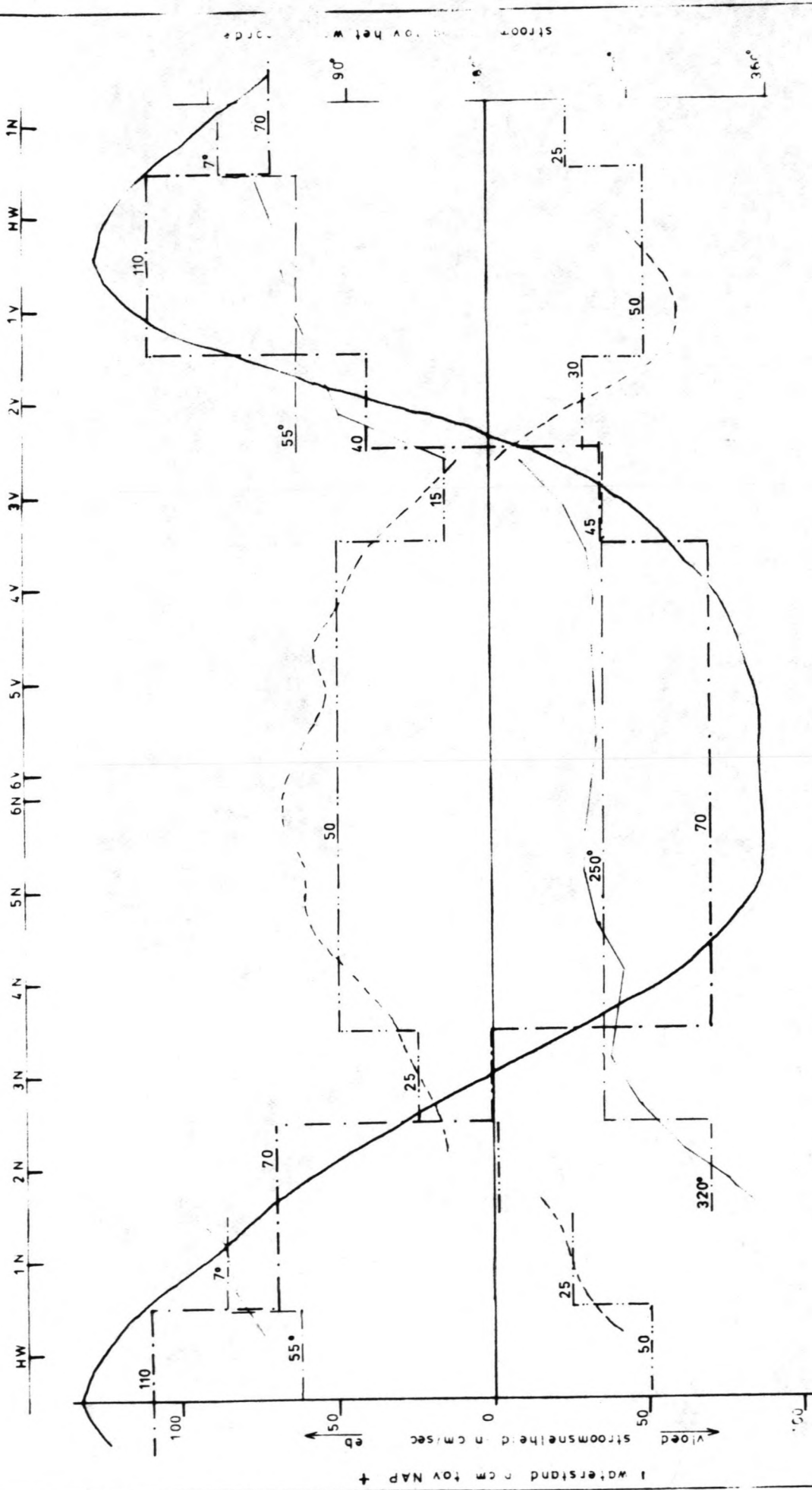
uren VOOR en NA HW Hoek van Holland

HW 1N 2N 3N 4N 5N 6N 6V 5V 4V 3V 2V 1V HW 1N



- waterstand HA VI
- - - stroomsnelheid
- ..... stroomrichting

waterstand, stroomsnelheid en  
 stroomrichting op de  
 stations 1N t/m 6N (1976)  
 Pagina 41



- geschematiseerde waterstand
- .-.- stroomsnelheid
- stroomrichting

Geschematiseerde waterstands-, stroomsnelheids- en stroomrichtingskromme  
Figuur 42

behoort bij: nota

nr. WWK7 - 81.500

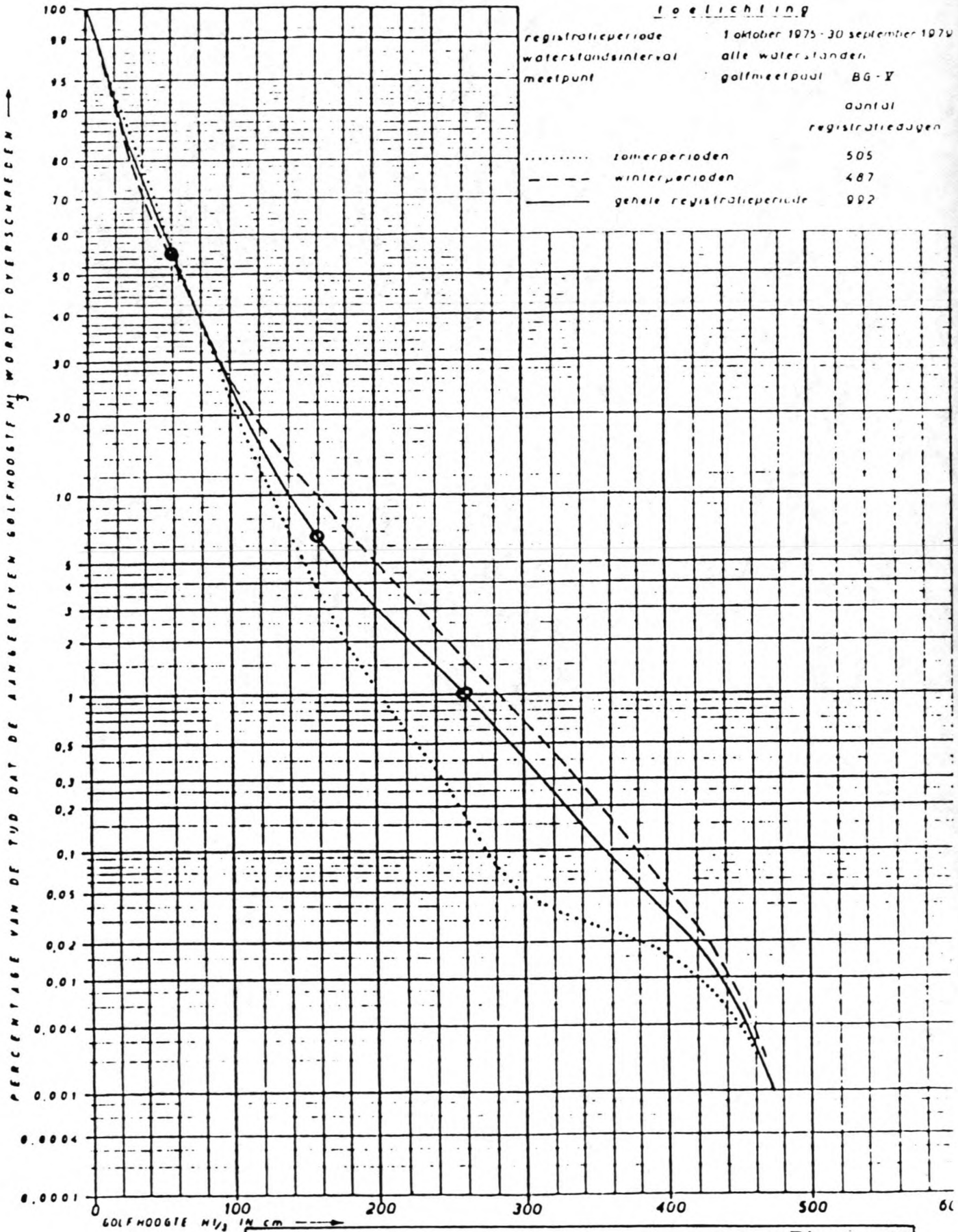
datum: juni 1981

bladnr: 31

Toelichting

registratieperiode: 1 oktober 1975 - 30 september 1979  
 waterstandsinterval: alle waterstanden  
 meetpunt: golfmeetpaal BG-Y

	aantal registratiedagen
..... zomerperioden	505
----- winterperioden	487
———— gehele registratieperiode	992



GOLFMEETPAAL BG-Y  
 OVERSCHRJDINGSKROMMEN VOOR DE GOLFHOOGTE  $H_{1/2}$   
 GEHELE REGISTRATIEPERIODE Figuur 43



Tabel voor het berekenen van golfparameters

L/h	Tanh kh										sinh kh	cosh kh	G	
	0.000	0.002	0.004	0.006	0.008	0.010	0.012	0.014	0.016	0.020				
0.20	0.000	0.002	0.004	0.006	0.008	0.010	0.012	0.014	0.016	0.020	0.026	0.033	0.043	0.050
0.50	0.000	0.002	0.004	0.006	0.008	0.010	0.012	0.014	0.016	0.020	0.026	0.033	0.043	0.050
1.00	0.000	0.002	0.004	0.006	0.008	0.010	0.012	0.014	0.016	0.020	0.026	0.033	0.043	0.050
2.00	0.000	0.002	0.004	0.006	0.008	0.010	0.012	0.014	0.016	0.020	0.026	0.033	0.043	0.050
3.00	0.000	0.002	0.004	0.006	0.008	0.010	0.012	0.014	0.016	0.020	0.026	0.033	0.043	0.050
4.00	0.000	0.002	0.004	0.006	0.008	0.010	0.012	0.014	0.016	0.020	0.026	0.033	0.043	0.050
5.00	0.000	0.002	0.004	0.006	0.008	0.010	0.012	0.014	0.016	0.020	0.026	0.033	0.043	0.050
6.00	0.000	0.002	0.004	0.006	0.008	0.010	0.012	0.014	0.016	0.020	0.026	0.033	0.043	0.050
7.00	0.000	0.002	0.004	0.006	0.008	0.010	0.012	0.014	0.016	0.020	0.026	0.033	0.043	0.050
8.00	0.000	0.002	0.004	0.006	0.008	0.010	0.012	0.014	0.016	0.020	0.026	0.033	0.043	0.050
9.00	0.000	0.002	0.004	0.006	0.008	0.010	0.012	0.014	0.016	0.020	0.026	0.033	0.043	0.050
10.00	0.000	0.002	0.004	0.006	0.008	0.010	0.012	0.014	0.016	0.020	0.026	0.033	0.043	0.050

TABLE 4 SINUSOIDAL WAVE FUNCTIONS

h = d

† E.g. 20h - 33h must not be used for  $\nu < -h/2$

2 SNOALING

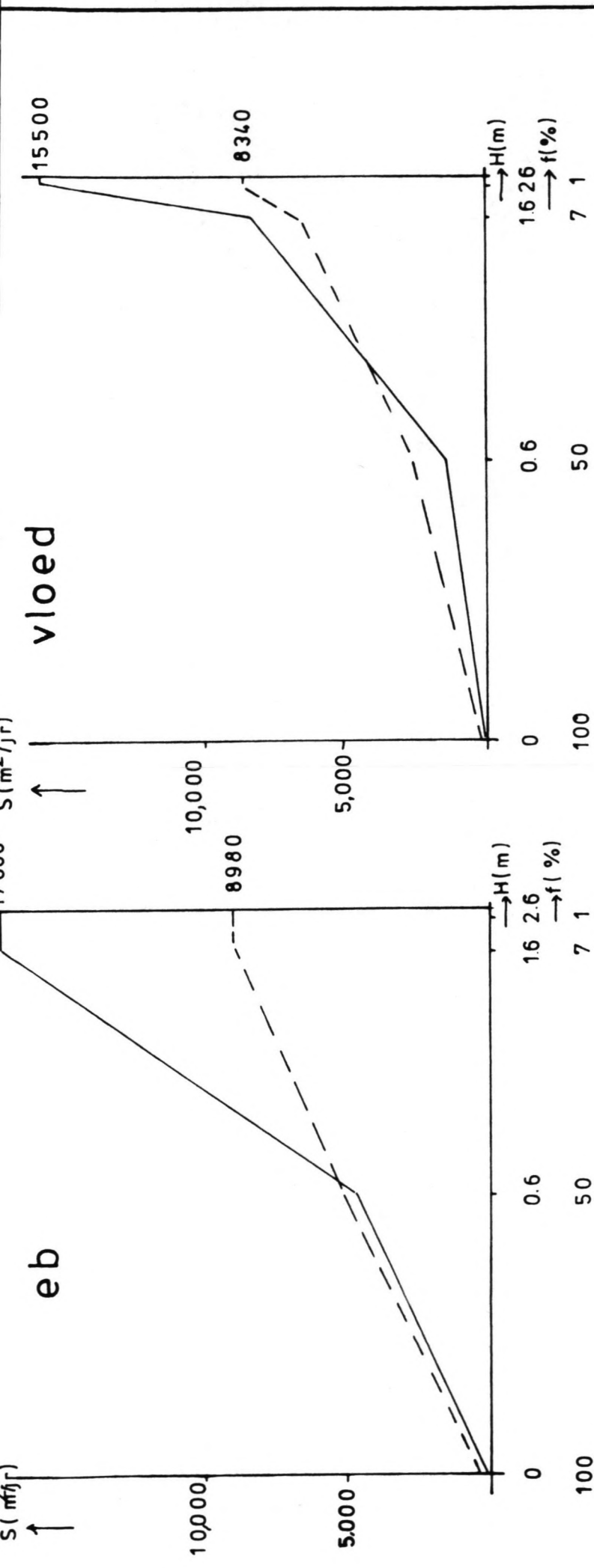
**1 LOCAL PARAMETERS**  
 GIVEN: h and T DETERMINE: L, c  
 Calculate  $L_0 = \frac{g}{2\pi} T^2$   
 (= 1.561 T<sup>2</sup> in SI-units)  
 Calculate  $\frac{h}{L_0}$  Find tanh kh from Table 4  
 Determine  $L = L_0 \tanh kh$  (Check\*)  
 Determine  $c = L/T$   
 (Given values of h and L: Find h/L<sub>0</sub> from h/L in Table 4 and hence T)  
 Check\*

**2 SNOALING**  
 GIVEN:  $M_0$  and T (or L<sub>0</sub>) at water depth h<sub>a</sub>  
 DETERMINE: h<sub>b</sub> and L<sub>b</sub> at water depth h<sub>b</sub>  
 Determine L<sub>0</sub> from 1  
 and  $M_0/L_0$  from Table 4 and hence M<sub>0</sub>  
 Determine L<sub>b</sub> from 1  
 and  $M_0/L_0$  from Table 4 and hence h<sub>b</sub>  
 Check\*

\*Calculator:  $U \approx ML^2/h^3$   
 If  $U < 15$ : Sinusoidal theory (ST) is applicable  
 If  $U > 15$  and  $h/L_0 < 0.1$ : Cnoidal theory (CT) will yield more reliable results  
 If  $U > 15$  and  $h/L_0 > 0.1$ : CT is meaningless and ST is unreliable

BASIC FORMULAE  
 (lowest order expressions)

Quantity	(SI-Unit)	General Expression	Deep Water	Shallow Water	(19a,b,c)
$\frac{h}{L}$ (Interval)		$0 < \frac{h}{L} < \infty$	$0.50 < \frac{h}{L} < \infty$	$0 < \frac{h}{L} < 0.050$	
$\frac{h}{L_0}$ (Interval)		$0 < \frac{h}{L_0} < \infty$	$0.50 < \frac{h}{L_0} < \infty$	$0 < \frac{h}{L_0} < 0.10$	
c	(m/s)	$\frac{g}{2\pi} \frac{L}{h} \tanh kh$	$\frac{g L_0}{2\pi h} \left(-\frac{g T}{2h}\right)$	$\sqrt{gh}$	
c <sub>g</sub>	(m/s)	$\frac{1}{2} c (1+G)$	$\frac{1}{2} c_0$	c	(20a,b,c)
E	(J/m <sup>2</sup> )	$\frac{1}{8} \rho g H^2$	$\frac{1}{8} \rho g H_0^2$	$\frac{1}{8} \rho g H^2$	(21a,b,c)
E <sub>T</sub>	(W/m)	$\frac{1}{16} \rho g H^2 c (1+G)$	$\frac{1}{16} \rho g H_0^2 c_0$	$\frac{1}{8} \rho g H^2 c$	(22a,b,c)
F <sub>m</sub>	(W/m)	$\frac{1}{16} \rho g H^2 (1+G)$	$\frac{1}{16} \rho g H_0^2$	$\frac{1}{8} \rho g H^2$	(23a,b,c)
F <sub>D</sub>	(W/m)	$\frac{1}{10} \rho g H^2 G$	0	$\frac{1}{9} \rho g H^2$	(24a,b,c)
F <sub>U</sub>	(W/m)	$\frac{1}{16} \rho g H^2 (1+2G)$	$\frac{1}{16} \rho g H_0^2$	$\frac{3}{16} \rho g H^2$	(25a,b,c)
G		$G \approx \frac{2kh}{\sinh 2kh}$	0	1	(26a,b,c)
qh	(m)	$\frac{H^2}{16h} G$	0	$\frac{H^2}{16h}$	(27a,b,c)
P <sub>max</sub>	(N/m <sup>2</sup> )	$P_{max} - \rho g z$	$\uparrow P_{max,0} - \rho g z$	$\rho g \frac{z}{2} - \rho g z$	(28a,b,c)
P <sub>max</sub> <sup>*</sup>	(N/m <sup>2</sup> )	$\rho g \frac{H}{2} \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh}$	$\uparrow \rho g \frac{H_0}{2} \exp(k_0 z)$	$\rho g \frac{z}{2}$	(29a,b,c)
u <sub>max</sub>	(m/s)	$\frac{H}{T} \frac{\cosh k(z+h)}{\sinh kh}$	$\uparrow \frac{H_0}{T} \exp(k_0 z)$	$\frac{H}{2} c$	(30a,b,c)
v <sub>max</sub>	(m/s)	$\frac{H}{T} \frac{\sinh k(z+h)}{\sinh kh}$	$\uparrow \frac{H_0}{T} \exp(k_0 z)$	$\frac{H}{2} c \left(1 + \frac{z}{h}\right)$	(31a,b,c)
a	(m)	$-\frac{H}{2} \frac{\cosh k(z+h)}{\sinh kh}$	$\uparrow \frac{H_0}{2} \exp(k_0 z)$	$\frac{H}{2} \frac{L}{2\pi h}$	(32a,b,c)
b	(m)	$\frac{H}{2} \frac{\sinh k(z+h)}{\sinh kh}$	$\uparrow \frac{H_0}{2} \exp(k_0 z)$	$\frac{H}{2} \left(1 + \frac{z}{h}\right)$	(33a,b,c)



—  $r = 0.03$  m

- - -  $r = 0.12$  m

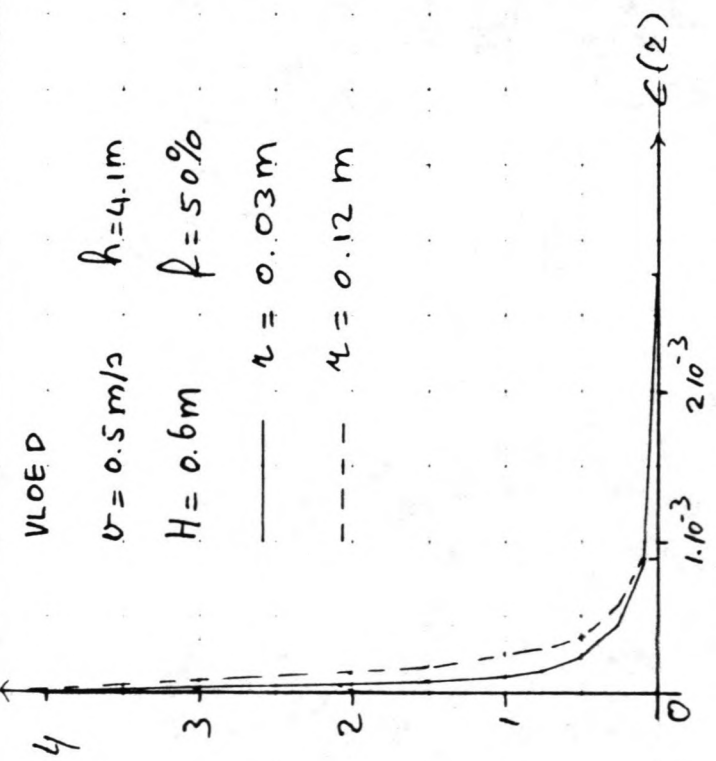
$r$ (m)	$S_{Teb}$ ( $m^2/jr$ )	$S_{Tvloed}$ ( $m^2/jr$ )
0.03	7060	3260
0.12	4990	3130

Gemiddeld jaarlijks zandtransport bij eb en vloed als functie van de golfhoogte en de overschrijdingsfrequentie

Figuur 45

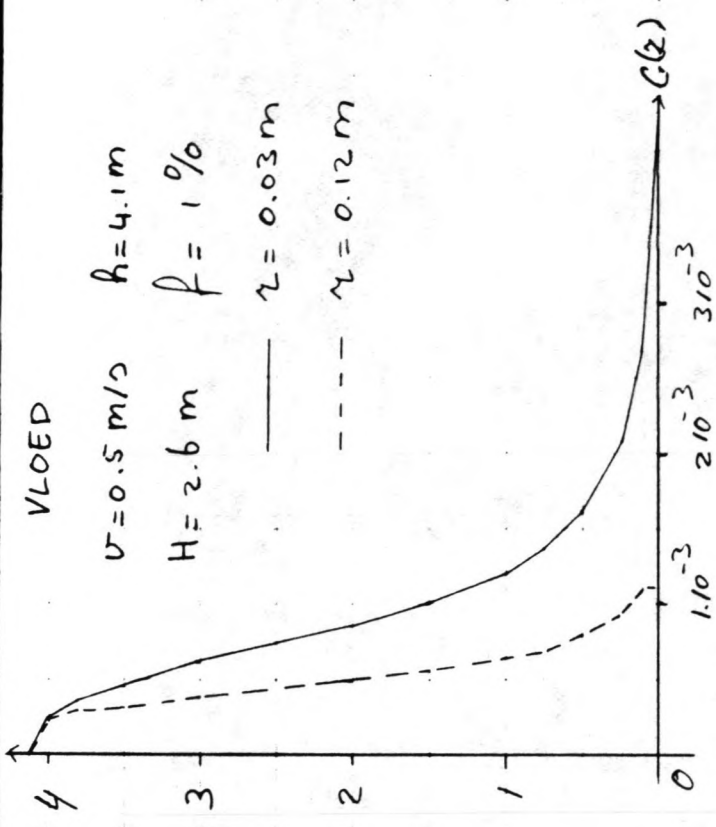
VLOED

$v = 0.5 \text{ m/s}$   $h = 4.1 \text{ m}$   
 $H = 0.6 \text{ m}$   $f = 50\%$   
 —  $\lambda = 0.03 \text{ m}$   
 - - -  $\lambda = 0.12 \text{ m}$



VLOED

$v = 0.5 \text{ m/s}$   $h = 4.1 \text{ m}$   
 $H = 2.6 \text{ m}$   $f = 1\%$   
 —  $\lambda = 0.03 \text{ m}$   
 - - -  $\lambda = 0.12 \text{ m}$



$z \text{ (m)}$	$S_{f50} (10 \text{ m/s})$	$S_{f50} (10 \text{ m/s})$	$c_{f50} (10^{-3})$	$z_{50}$
0.03	217	14.3	2.78	.852
0.12	401	22.1	.875	.543

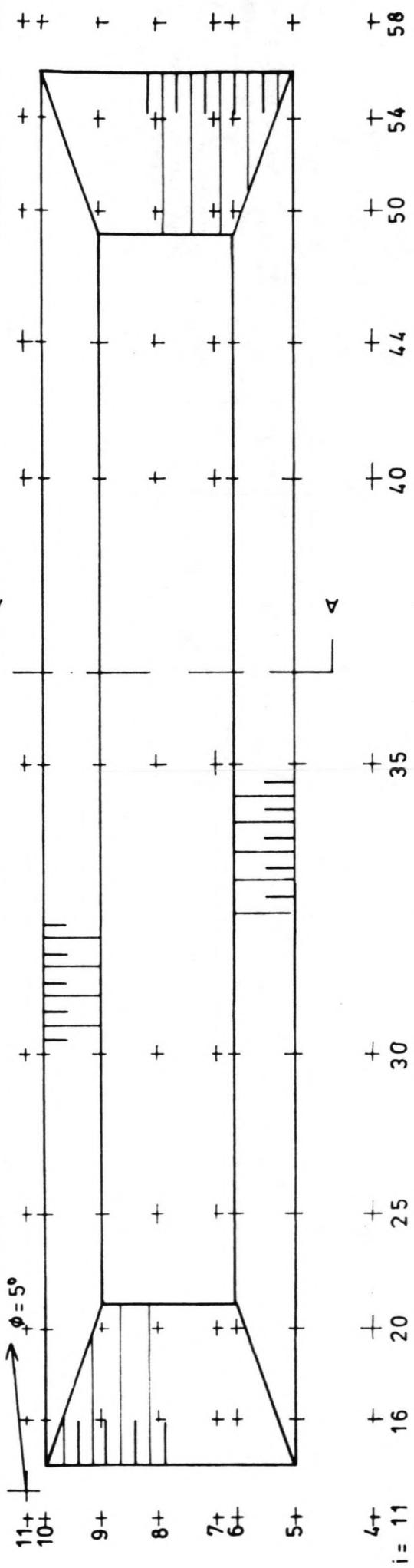
$z \text{ (m)}$	$S_{f1}$ ( $10 \text{ m/s}$ )	$S_{f1} (10 \text{ m/s})$	$c_{f1} (10^{-3})$	$z^*$
0.03	2370	21.9	4.26	.332
0.12	1290	27.8	1.10	.228

Concentratieverticalen voor de golfhoogten van 0.6m en 2.6m bij ribbelhoogten van 0.03m en 0.12m

Figuur 46

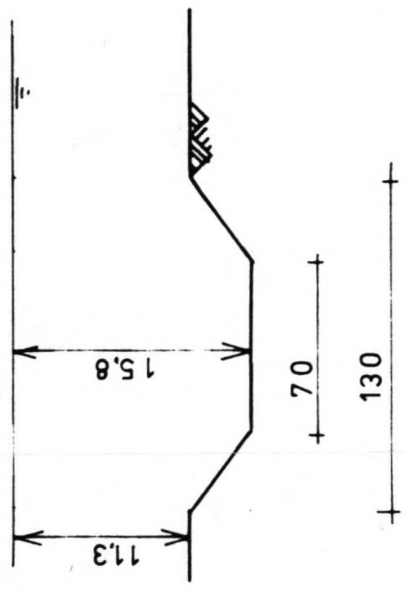
V = 0.3 m/s

$\phi = 5^\circ$



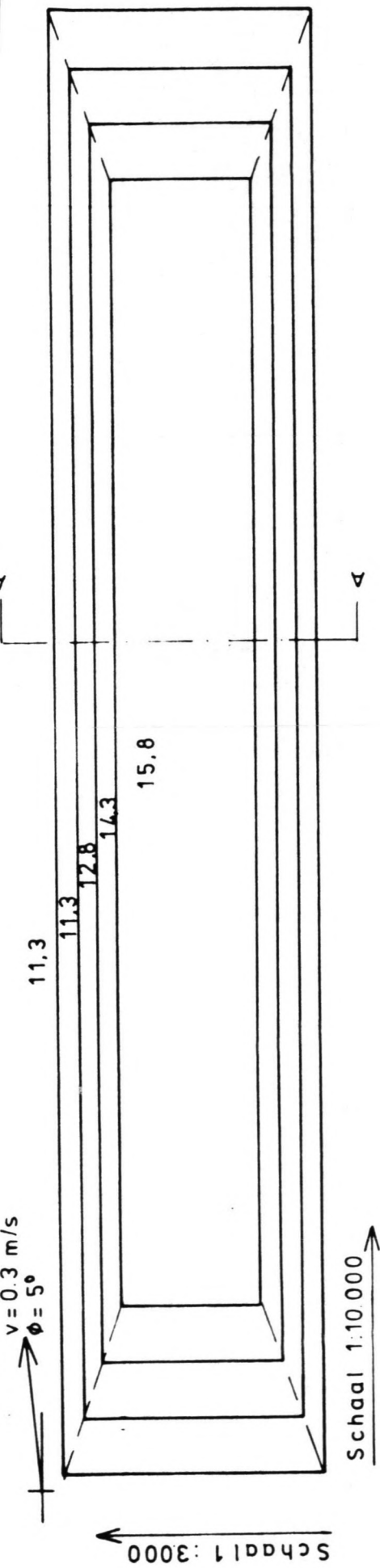
Schaal 1:3000

Schaal 1:10000

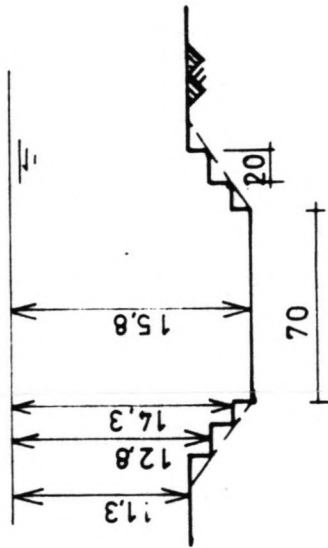


DSN AA

Proefgeul bij Bahia Blanca (Argentinië) met de roosterpunten daarin zoals gehanteerd bij het computerprogramma ODYSSEE  
 Figuur 47

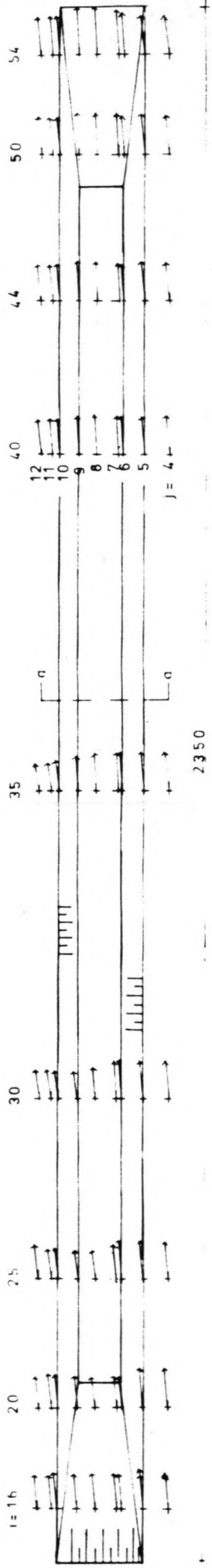


— Geschematiseerde dieptelijnen  
 - - - Werkelijke dieptelijnen



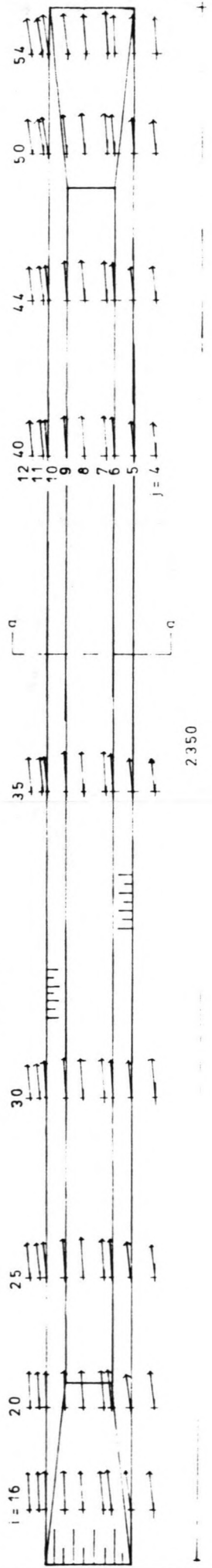
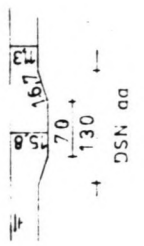
Schematisatie van de proefseul bij  
 Bahia Blanca (Argentinië)

Figuur 48



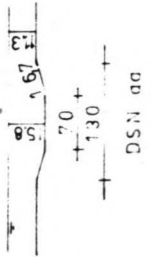
STROMINGSBEELD BEREKEND MET VXCST

maten in m  
0 30 60 cm/s



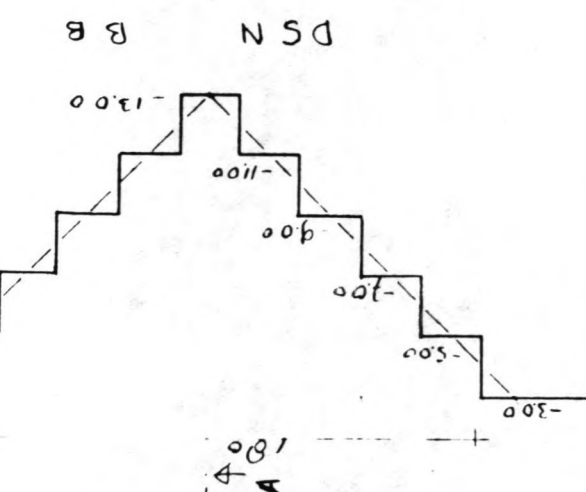
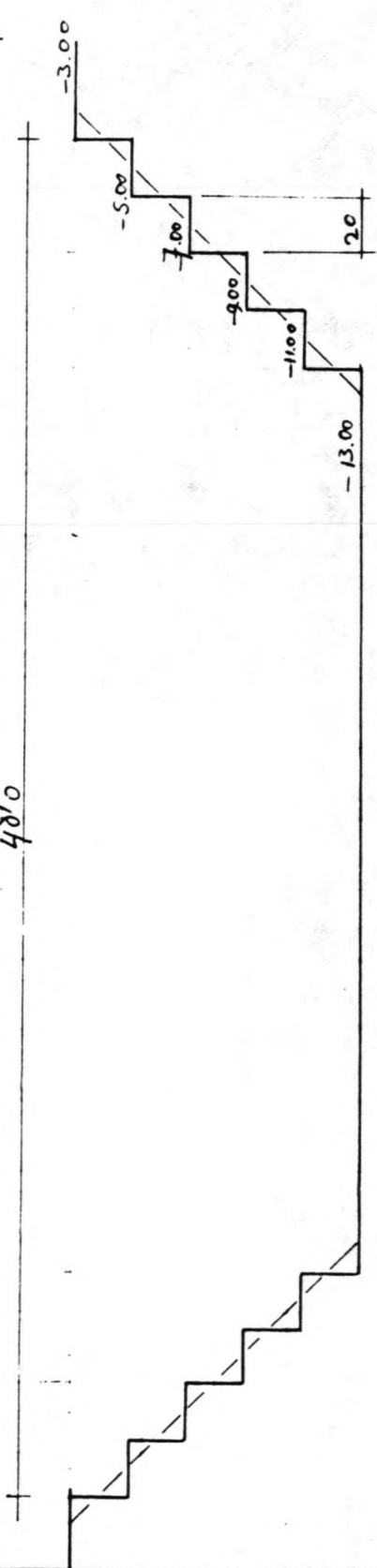
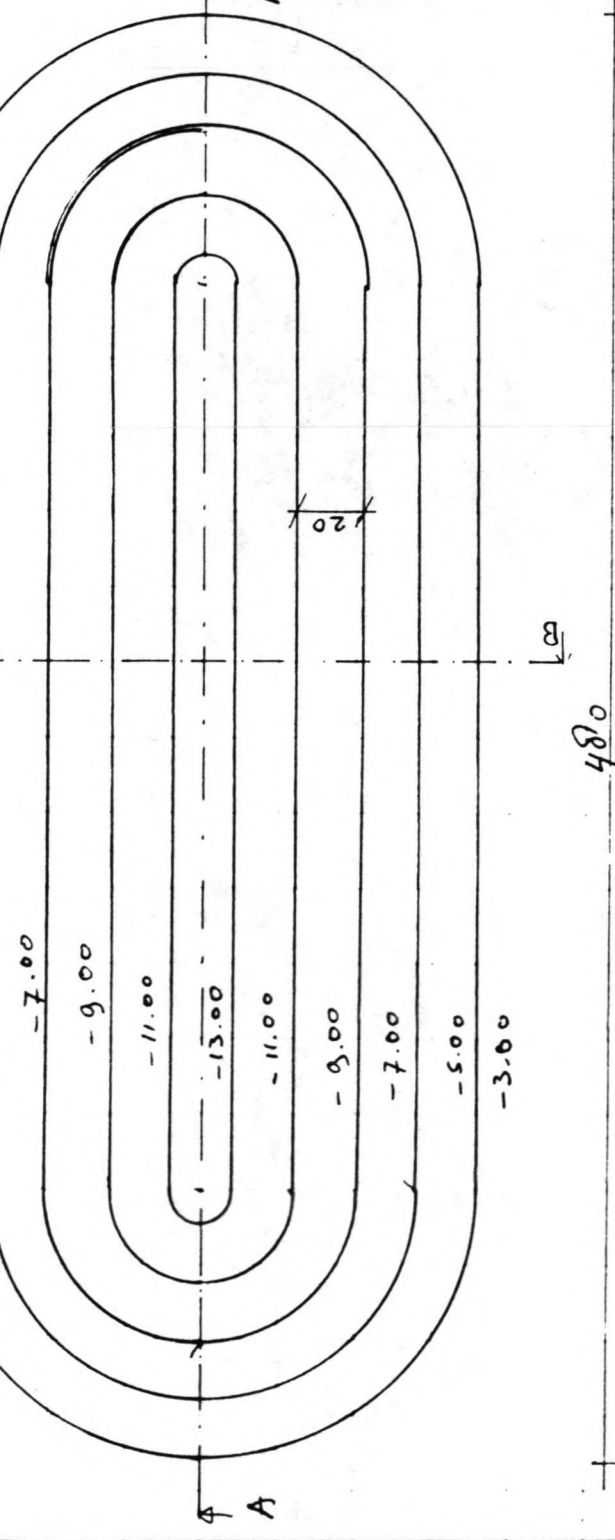
STROMINGSBEELD BEREKEND MET ODYSSEE

maten in m  
0 30 60 cm/s



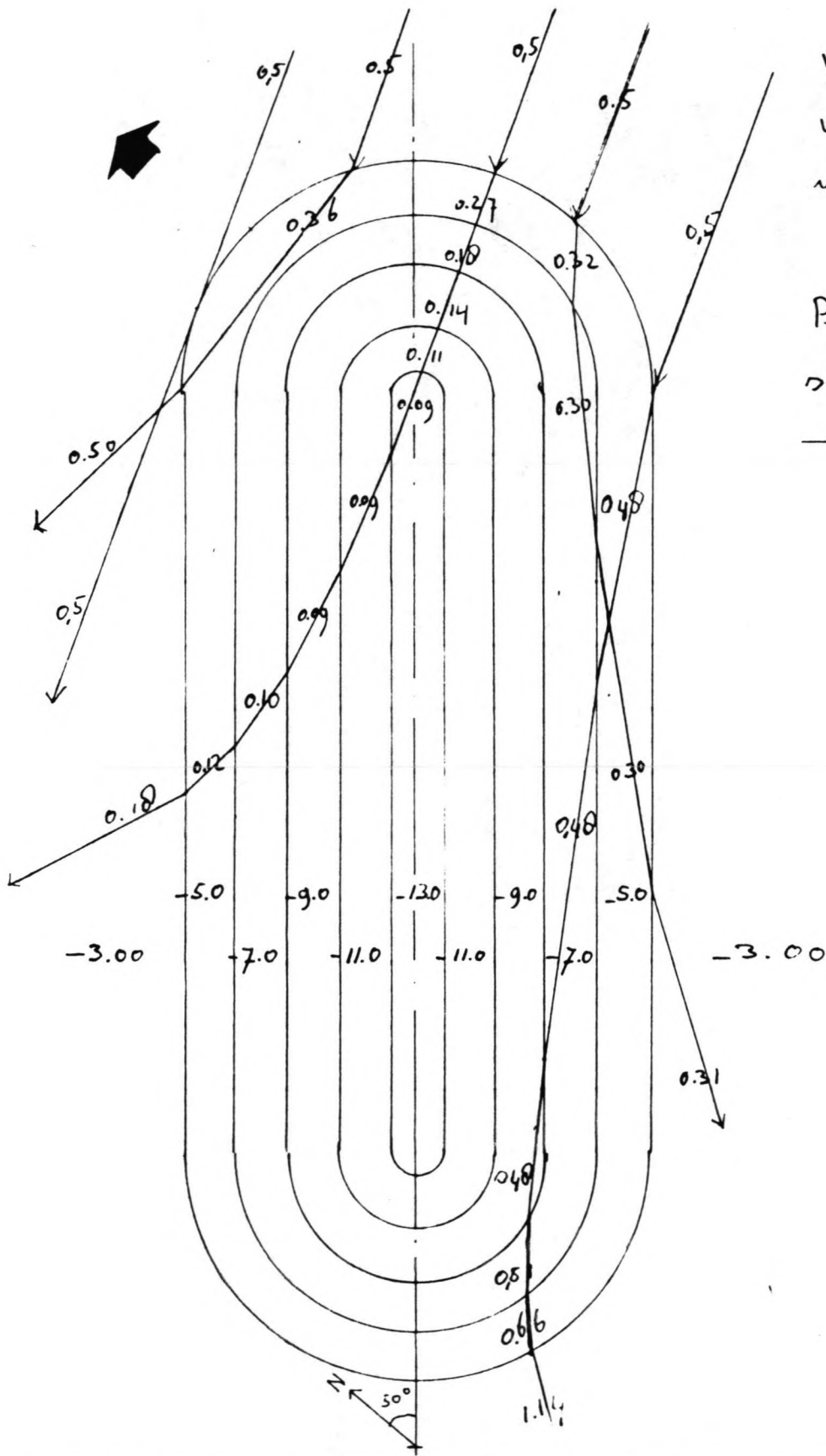
Handwritten notes in a box, including the name 'J. J. van der Vliet' and other illegible text.





DSN A A

Geschematiseerde winput	Figuur 50
Schaal horizontaal 1:2500	Peilen in m t.o.v. NAP
Schaal verticaal 1:250	maten in m



w.s. = NAP - 0,7 m

$v = 0,5 \text{ m/s}$

richting  $250^\circ$

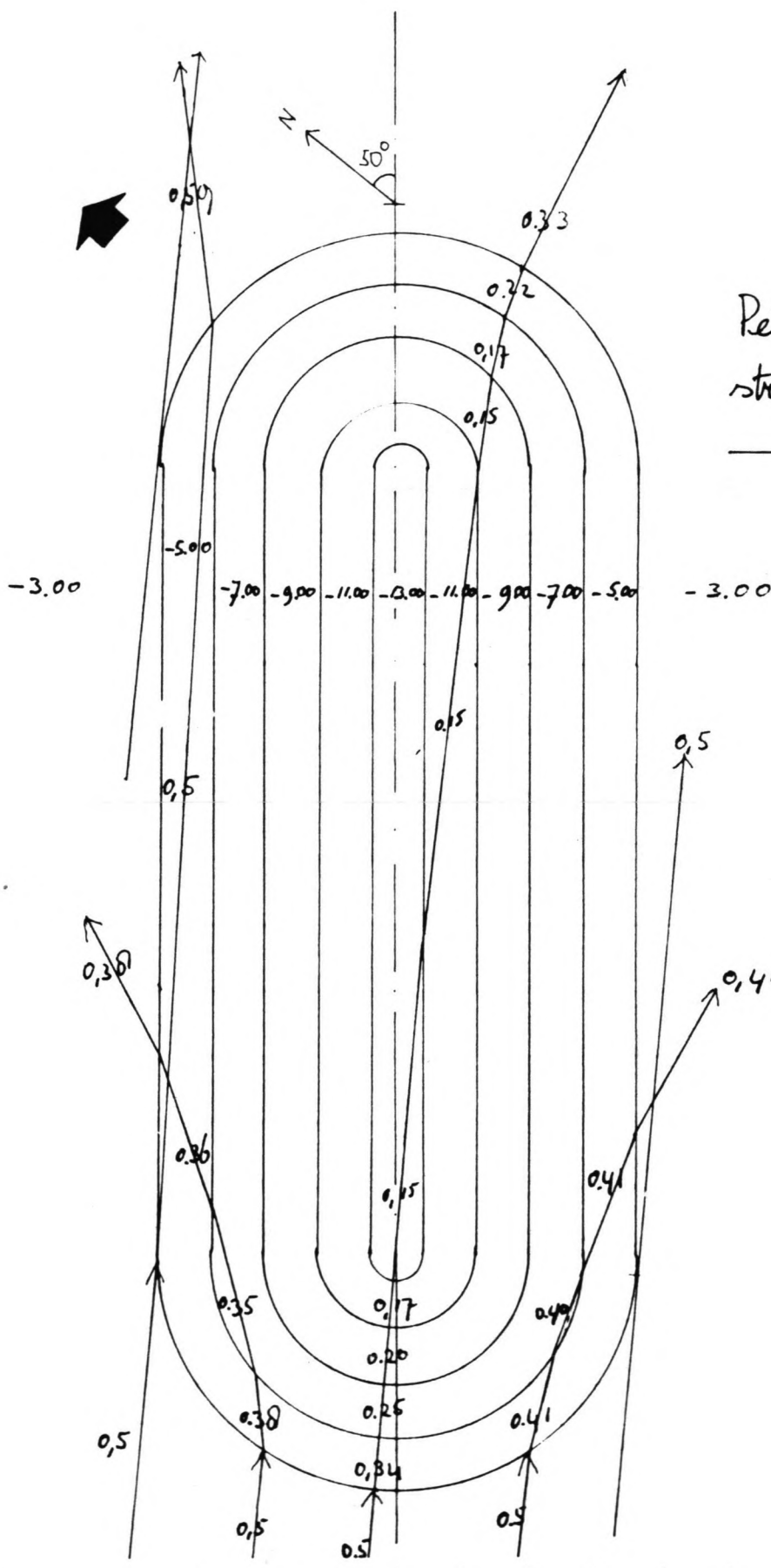
Peilen t.o.v. NAP  
 stroomsnelheden in m/s

→ stroomlijn

Stroombeeld in de winput met de lengteas onder een hoek van  $50^\circ$  met het noorden en een waterstand van NAP - 0,7m

Schaal 1:2500

Figuur 51

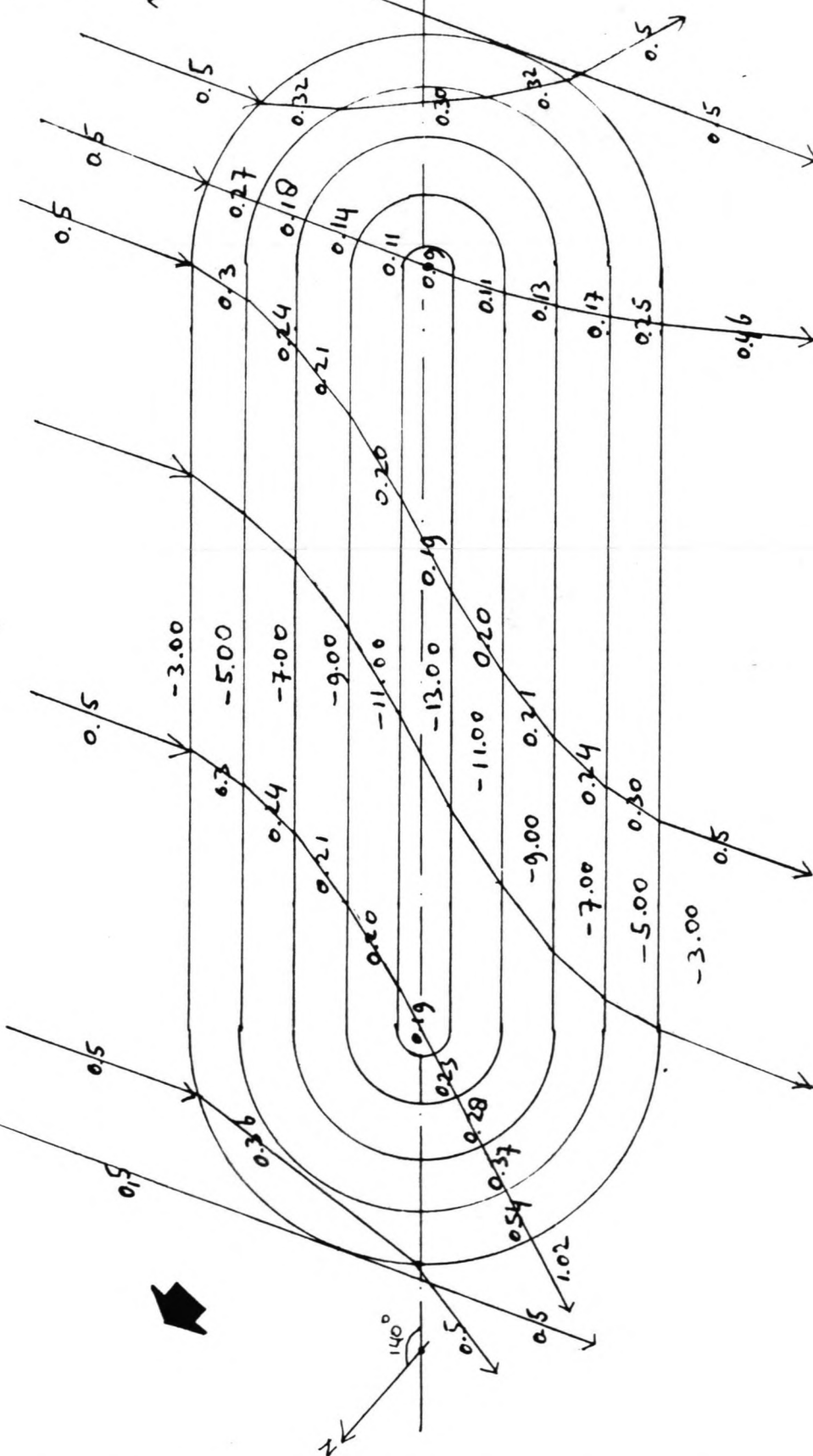


$W.S. = NAP + 1,1m$   
 $v = 0,5 m/s$   
 richting  $55^\circ$

Peilen in m t.o.v. NAP  
 stroomsnelheden in m/s  
 —→ stroomlijn

Stroombeeld in de winput met de lengteas onder een hoek van  $50^\circ$  met het noorden en een waterstand van NAP +1.1m  
 Schaal 1:2500 Figuur 52

WS = NAP - 0,7m  
 v = 0,5 m/s  
 richting 250°

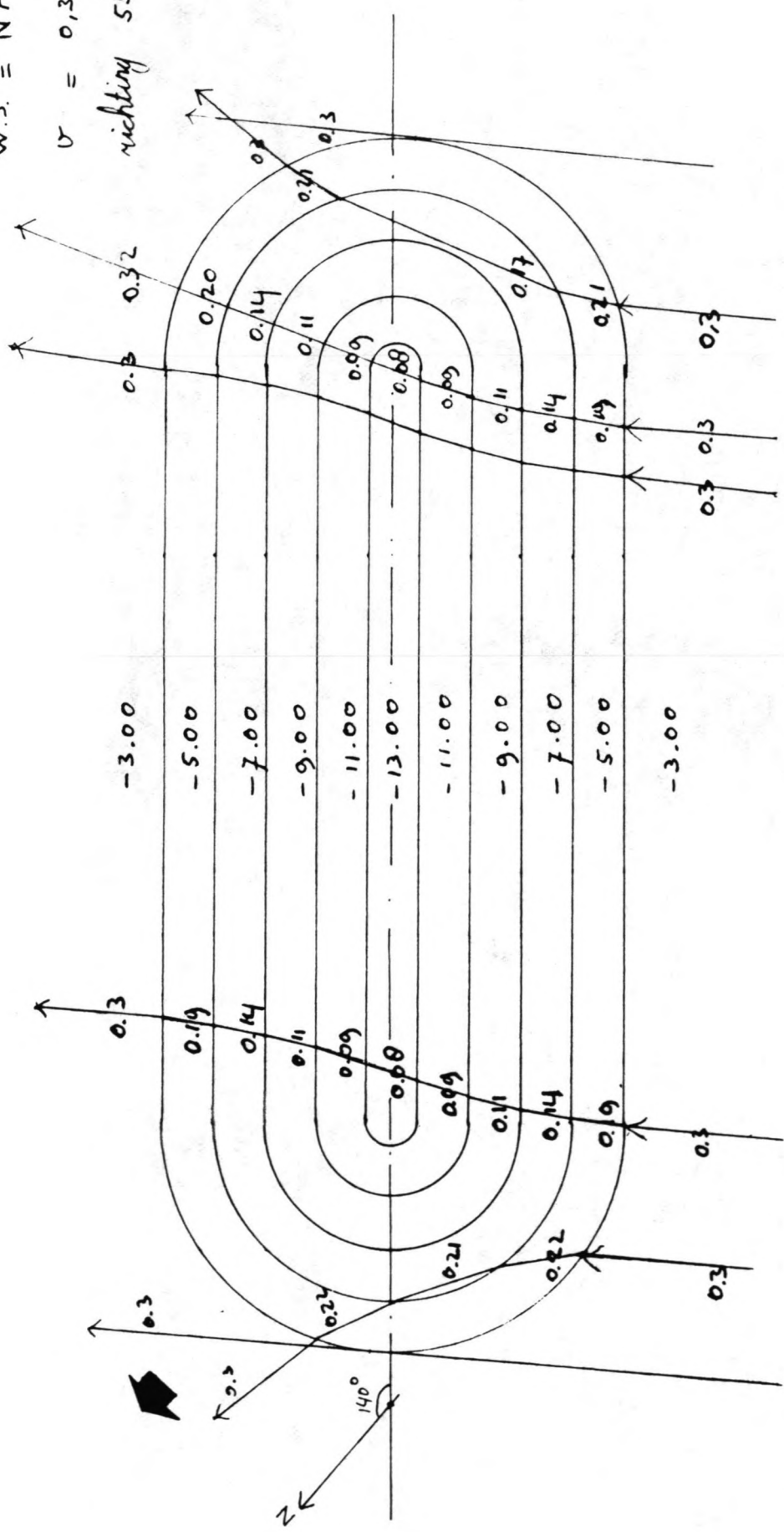


Peilen in m t.o.v. NAP  
 stroomsnelheden in m/s  
 → stroomlijn

Stroombeeld in de winput met de lensreus onder een hoek van 140° met het noorden en een waterstand van NAP -0.7m  
 Schaal 1:2500  
 Figuur 53

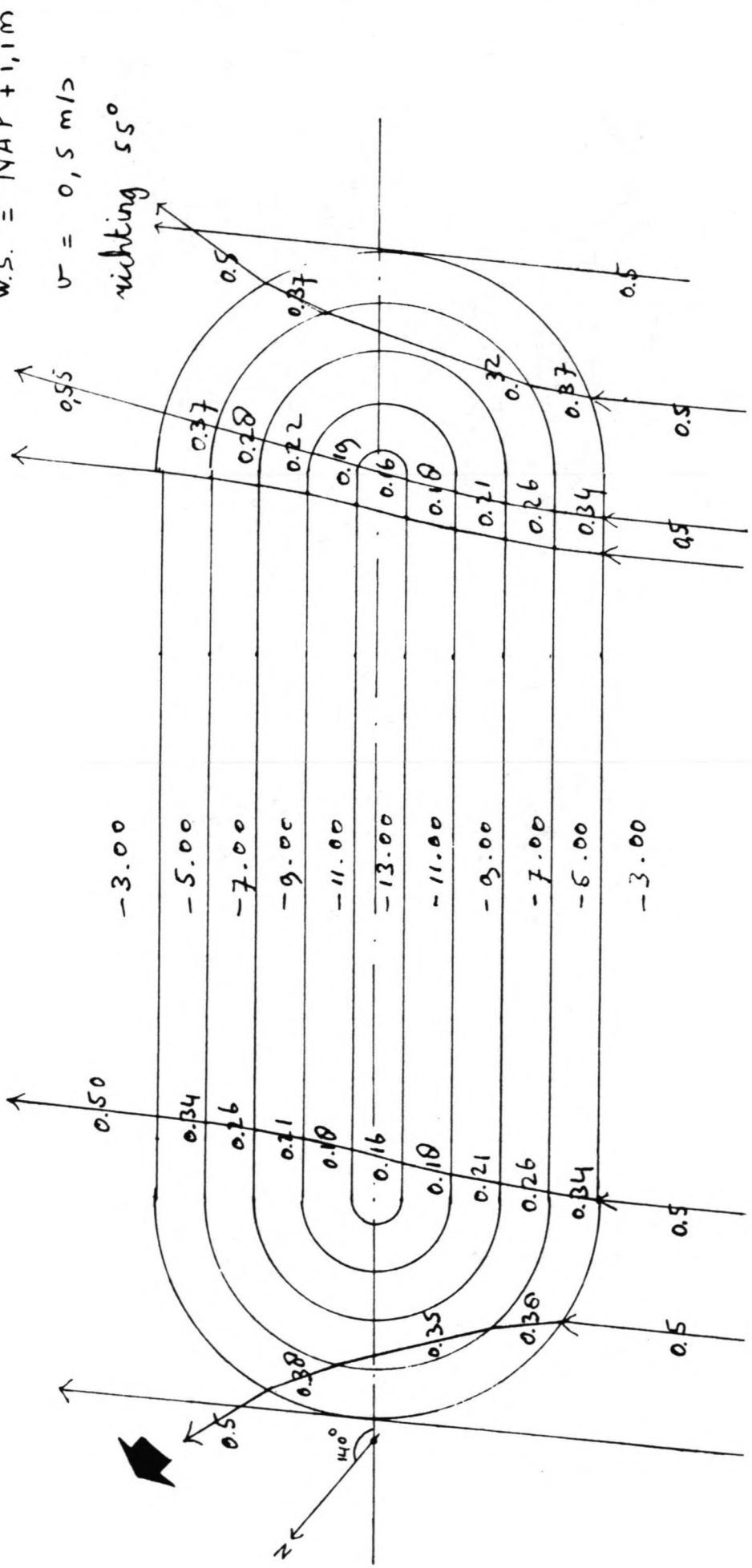
W.S. = NAP + 0,4m

$v = 0,3 \text{ m/s}$   
richting  $55^\circ$



Peilen in m t.o.v. NAP  
stroomsnelheden in m/s  
→ stroomlijn

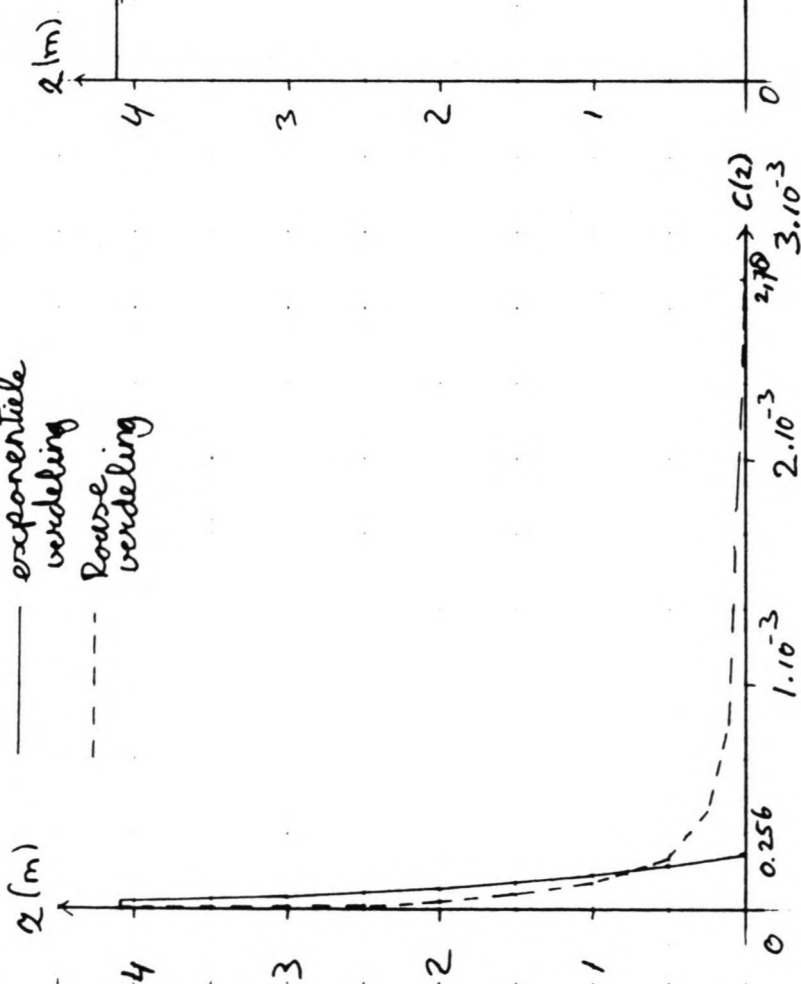
Stroombeeld in de winput met de lengteas onder een hoek van  $140^\circ$  met het noorden en een waterstand van NAP + 0.4m  
Schaal 1:2500  
Figuur 54



Stroombeeld in de winput met de lengteas onder een hoek van  $140^\circ$  met het noorden en een waterstand van NAP +1.1m  
 Schaal 1:2500  
 Figuur 55

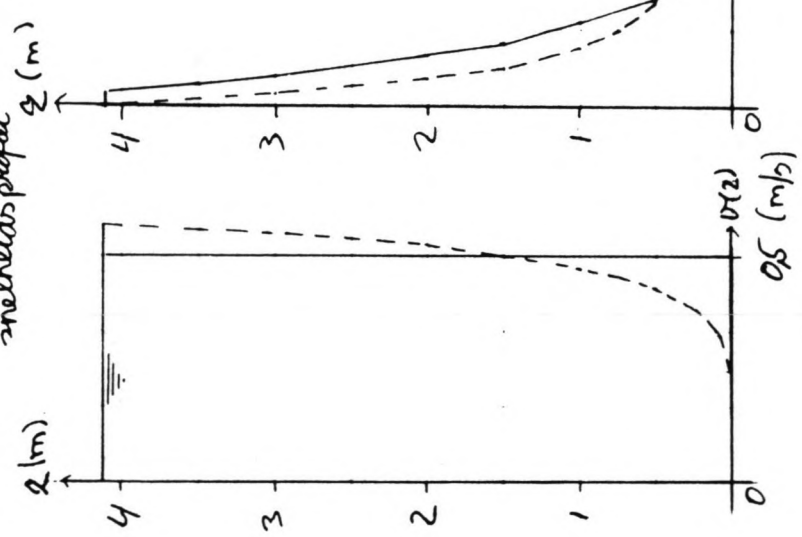


— exponentiële verdeling  
 - - - Rouse verdeling



$\lambda = 0.03 \text{ m}$        $H = 0.6 \text{ m}$   
 $\bar{u} = 0.5 \text{ m/s}$        $c_{f \text{ exp}} = 0.256 \cdot 10^{-3}$   
 $c_{f \text{ Rouse}} = 2.17 \cdot 10^{-3}$

- - - logaritmisch snelheidsprofiel

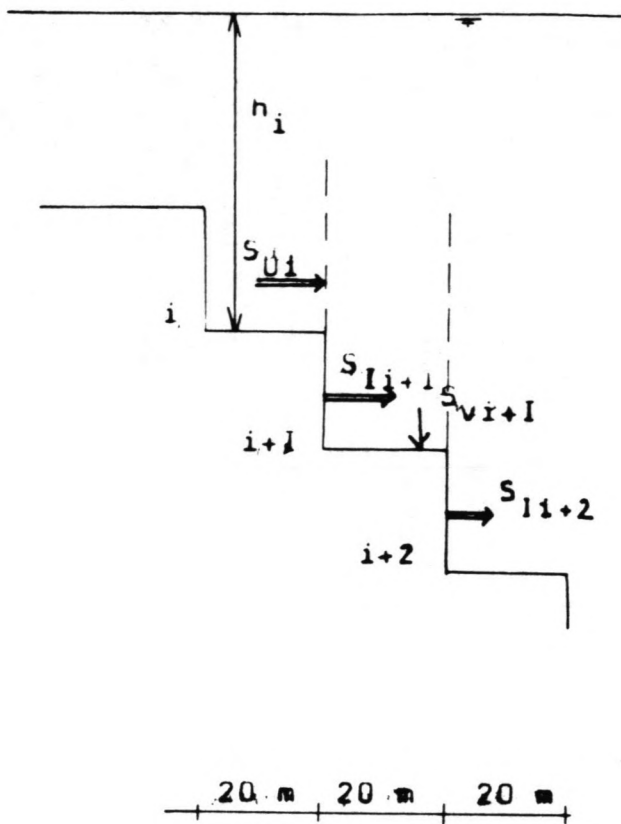


- - - exponentiële verdeling transport volgens Bijker

$c(z)/u(z)$   
 $(\text{m/s})$

$u(z)$   
 $(\text{m/s})$

Concentratie-, stroomsnelheids- en transportverdeling over de verticaal bij de exponentiële verdeling en bij gebruik van de Bijkerformule      Figuur 56



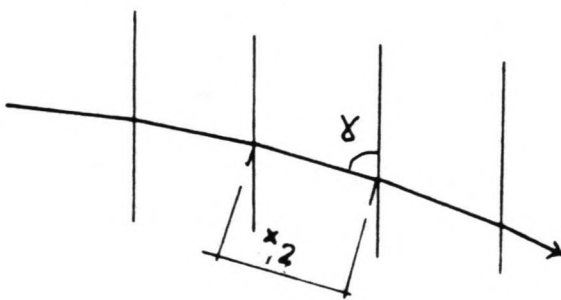
$$S_{U_i} = S_{I_{i+1}}$$

$$S_{I_{i+1}} = S_{V_{i+1}} + S_{U_{i+1}}$$

$S_U$  = uitgaand transport

$S_I$  = inkomend transport

$S_V$  = geaccumuleerde  
aanzanding



$$x_2 = \frac{20 \text{ m}}{\sin \gamma}$$

$x_2$  = lengte van de  
traptrede onder  
de stroomlijn

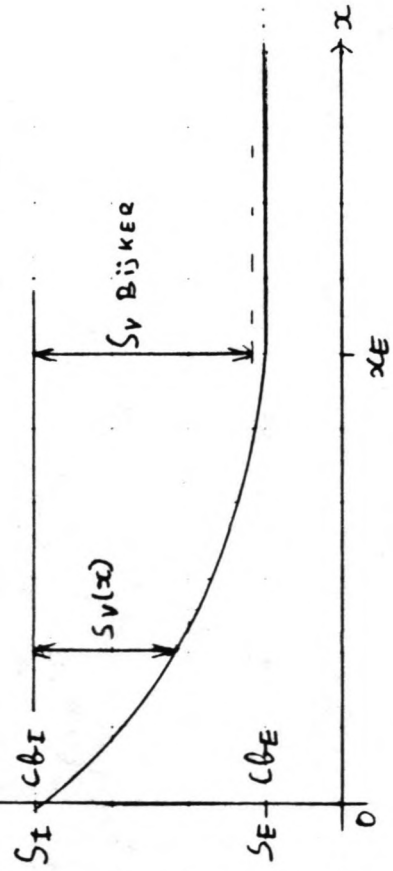
—————> stroomlijn

Defenitieschets in- en uitgaand transport per traptrede  
en de lengte van de trede onder een stroomlijn

Figuur 57

$S(x) \uparrow c_b(x)$

### MODEL BOETERS



A

voor  $0 < x < x_E$ :  $c_b(x) = c_{bI} \exp -\alpha x$

$S(x) = S_I \exp -\alpha x$

$S_V(x) = S_I - S(x)$

voor  $x \geq x_E$  :  $c_b(x) = c_{bE}$

$S(x) = S_E$

$S_V(x) = S_I - S_E$

B

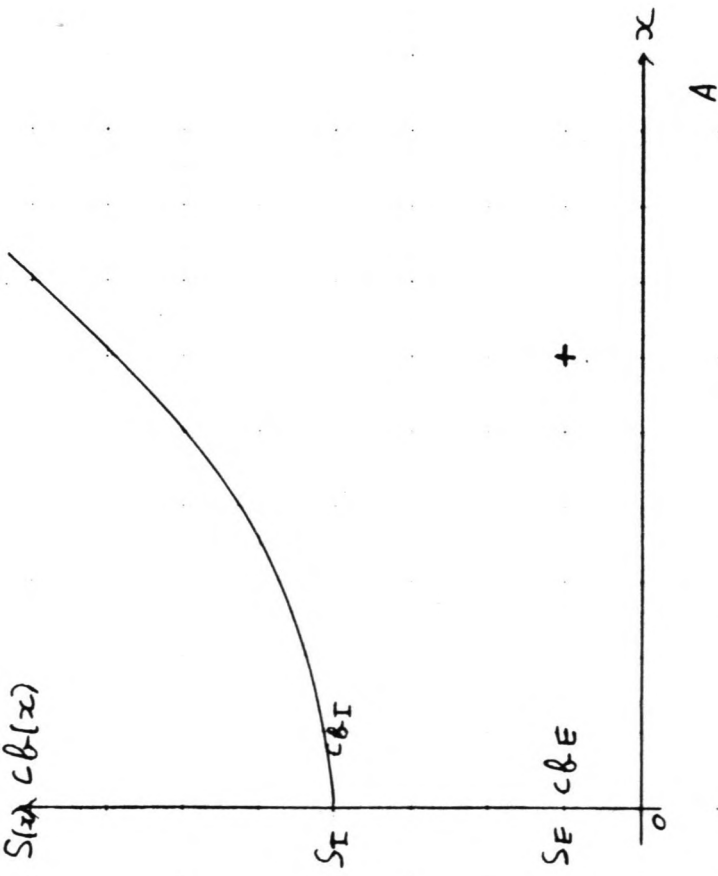
voor  $x > 0$ :  $c_b(x) = c_{bE} + (c_{bI} - c_{bE}) \exp -\beta x$

$S(x) = S_E + (S_I - S_E) \exp -\beta x$

$S_V(x) = S_I - S(x)$

$S_V(x)_{BOETERS} > S_V(x)_{BIJKER}$

Verloop van het zandtransport  $S(x)$  en de boemconcentratie  $c_b(x)$  volgens Boeters en volgens Bijker **Figuur 5P**



Oorspronkelijk model van Boeters

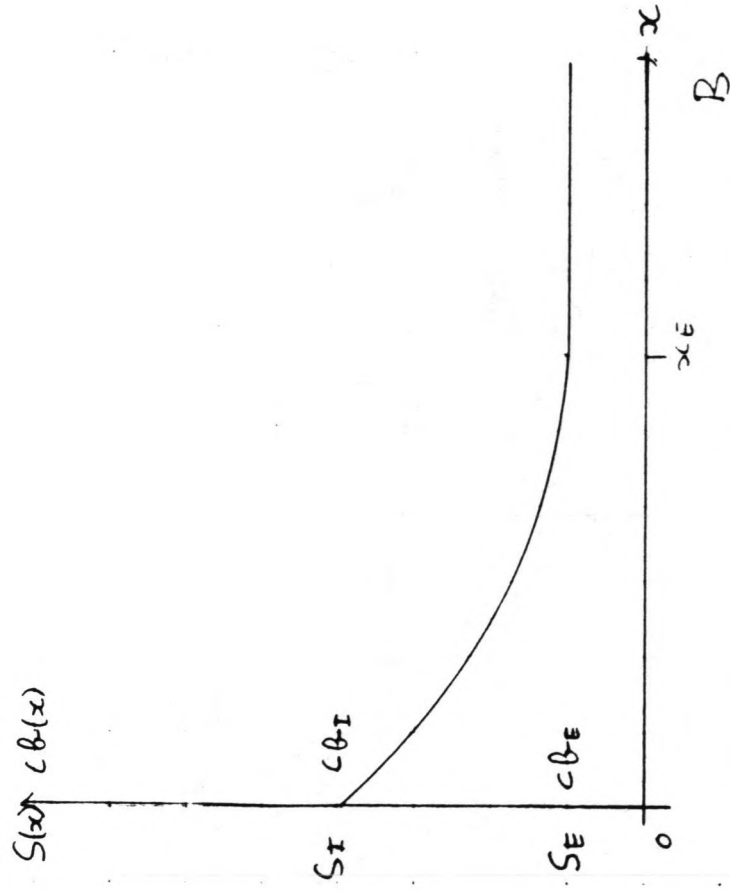
voor  $h_1 > h_2 \Rightarrow \alpha < 0$

en  $c\beta_I > c\beta_E$

of voor  $0 < x < x_E$ :

$$c\beta(x) = c\beta_I \exp - \alpha x$$

$$S(x) = S_I \exp - \alpha x$$



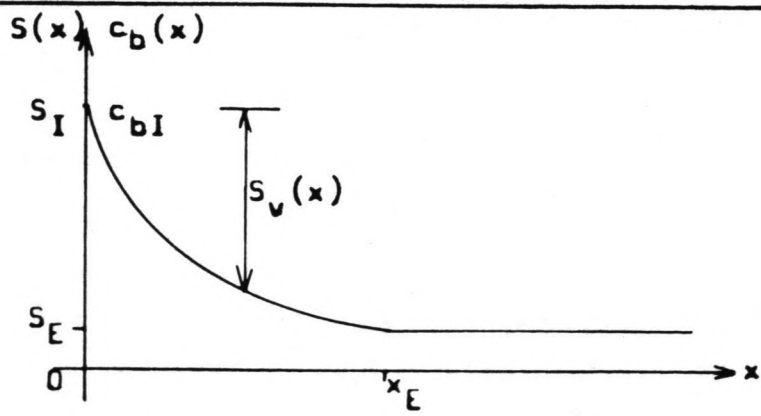
Uitgebreide model van Boeters:

voor  $h_1 > h_2$  en  $c\beta_I > c\beta_E$  geldt  $k = -1$

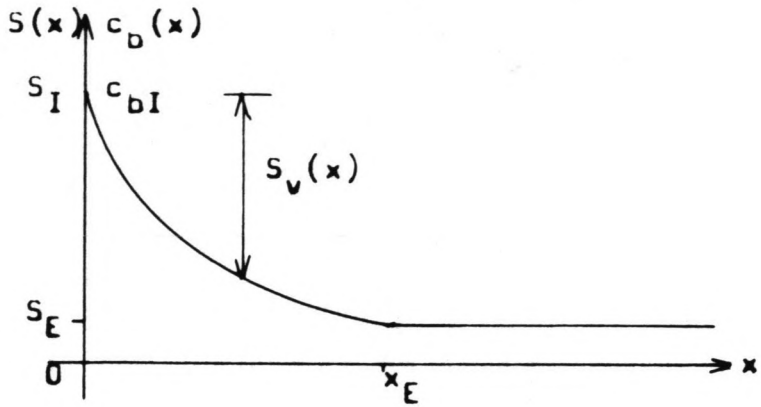
voor  $0 < x < x_E$ :  $c\beta(x) = c\beta_I \exp - kx$

$$S(x) = S_I \exp - kx$$

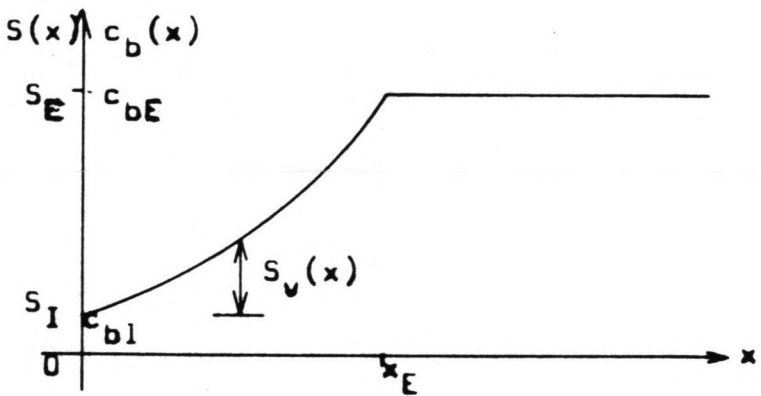
$n_{i-1} < n_i \Rightarrow \alpha > 0$   
 $c_{bIi} > c_{bEi}$   
 $k = +1$



$n_{i-1} > n_i \Rightarrow \alpha < 0$   
 $c_{bIi} > c_{bEi}$   
 $k = -1$

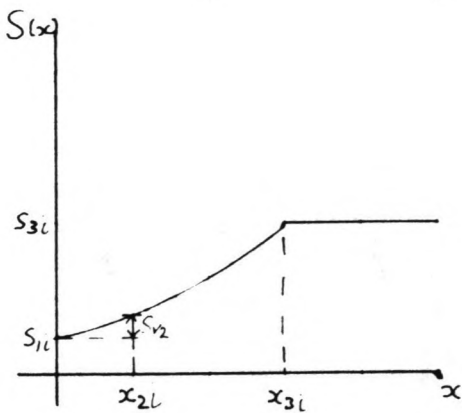


$n_{i-1} > n_i \Rightarrow \alpha < 0$   
 $c_{bIi} < c_{bEi}$   
 $k = +1$



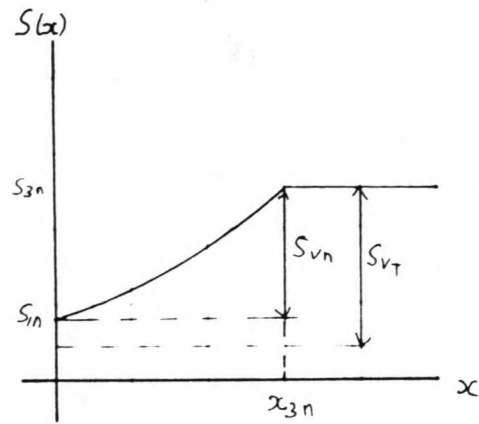
voor  $0 < x < x_E$  :  $c_b(x) = c_{bI} \exp(-k\alpha x)$   
 $S(x) = S_I \exp(-k\alpha x)$   
 $S_v(x) = S_I - S(x)$   
 voor  $x \geq x_E$  :  $c_b(x) = c_{bE}$   
 $S(x) = S_E$   
 $S_v(x) = S_I - S_E$

Definitieschets van het uitgebreide  
 model van Boeters Figuur 60



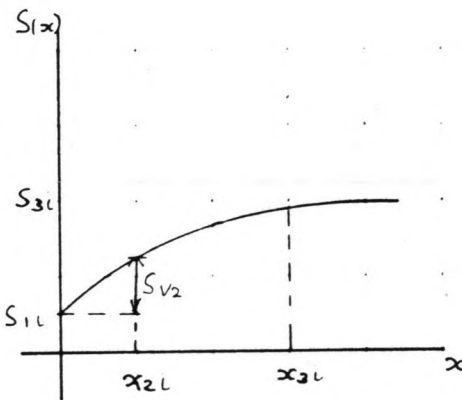
A

MODEL BOETERS 1<sup>e</sup> TRAPTREDE L



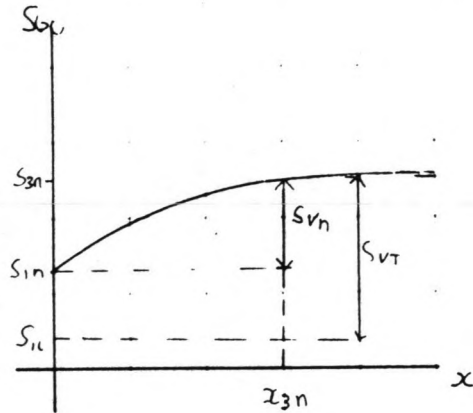
B

LAATSTE TRAPTREDE n



C

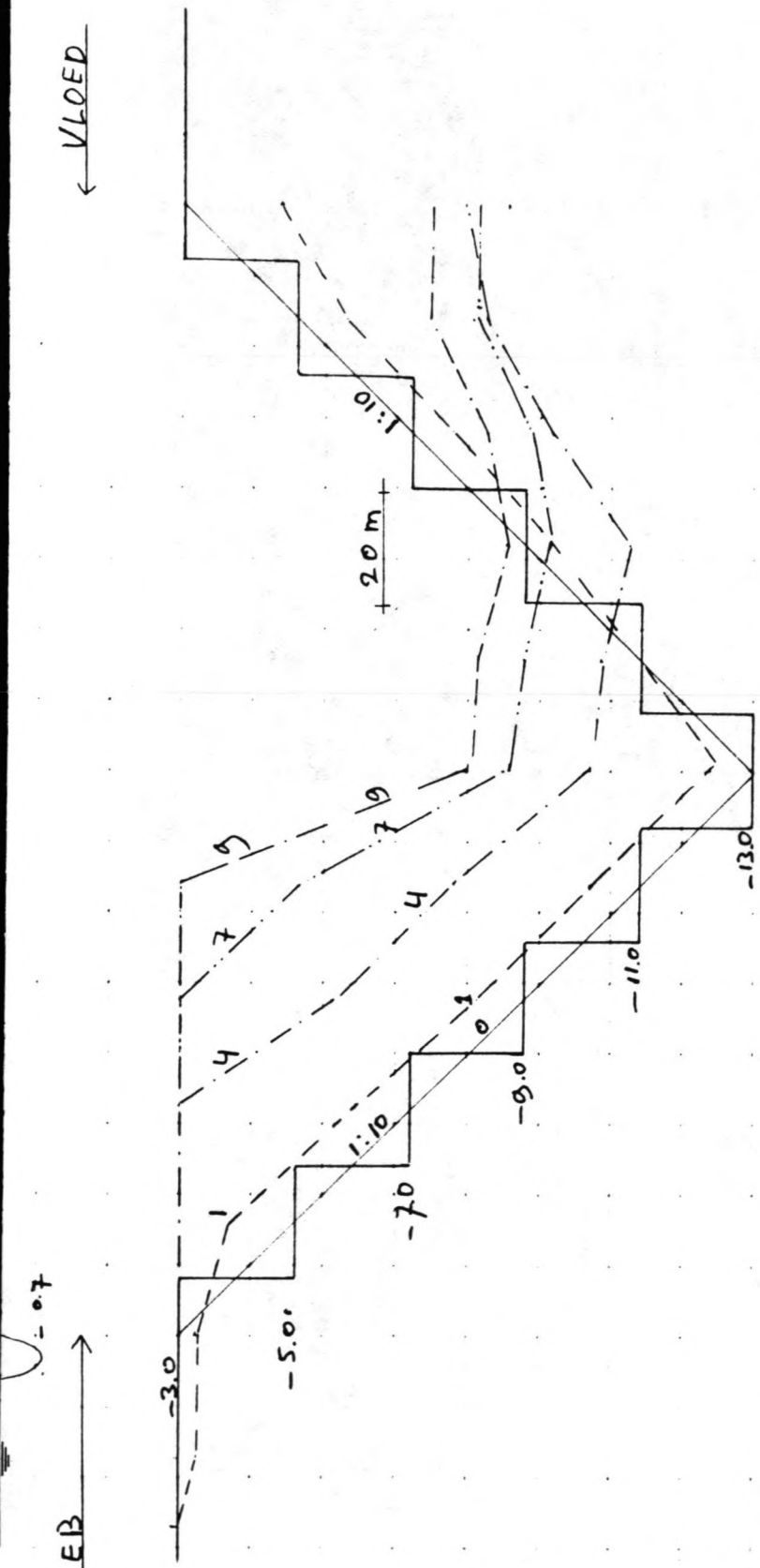
MODEL BIJKER 1<sup>e</sup> TRAPTREDE L



D

LAATSTE TRAPTREDE n

Verloop van het zandtransport  $S(x)$  volgens Boeters en volgens Bijker bij erosie



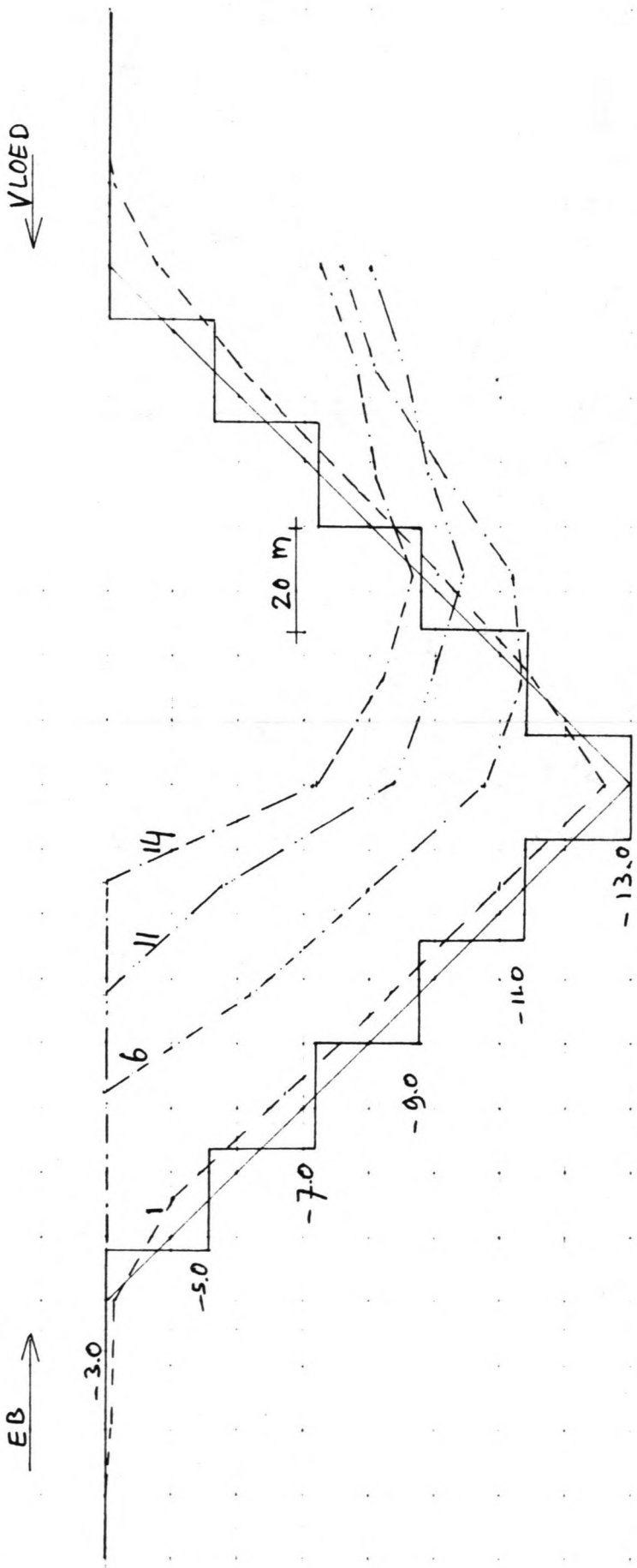
- SITUATIE ~~BĀS~~ AANVANG
- - - SITUATIE NA 1 WEEK
- - - " " " 4 "
- - - " " " 7 "
- - - " " " 9 "

PEILEN T.O.V. N.A.P.

Verloop van de aanzanding van de winput  
voor  $r = 0.03$  m

Figuur 62

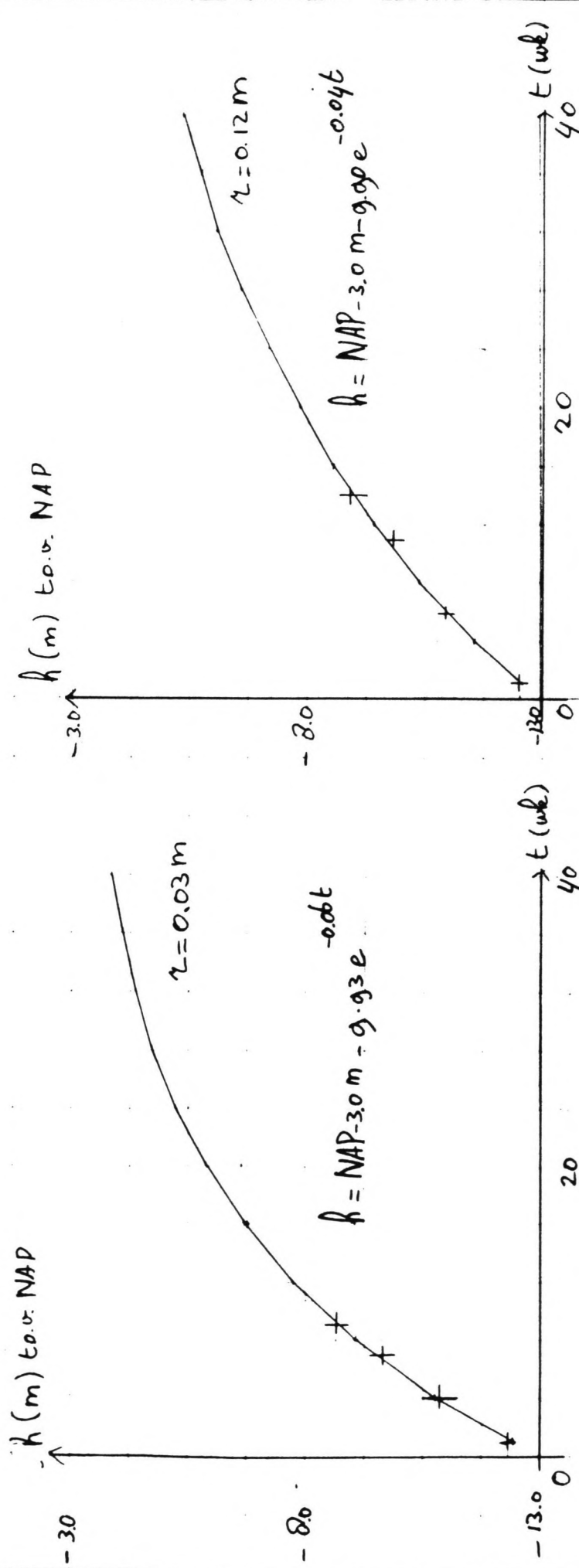




PEILEN T.O.V. N.A.P.

—	SITUATIE BIJ AANVANG
- - -	SITUATIE NA 4 WEEK
- · - · -	" " 6 "
- · - · -	" " 11 "
- · - · -	" " 14 "

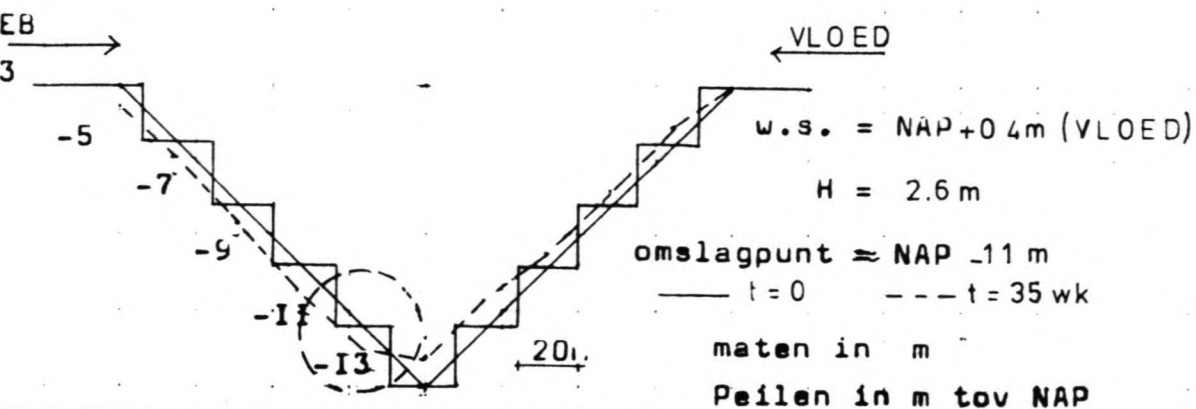
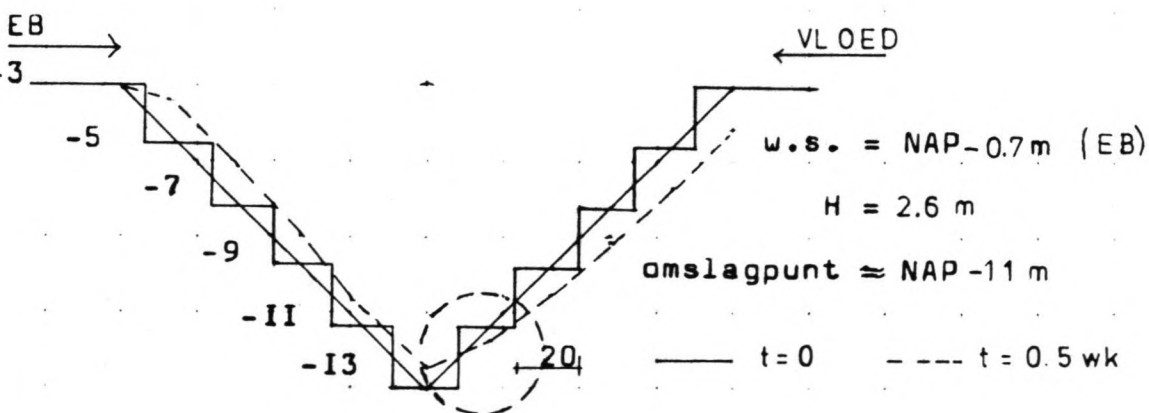
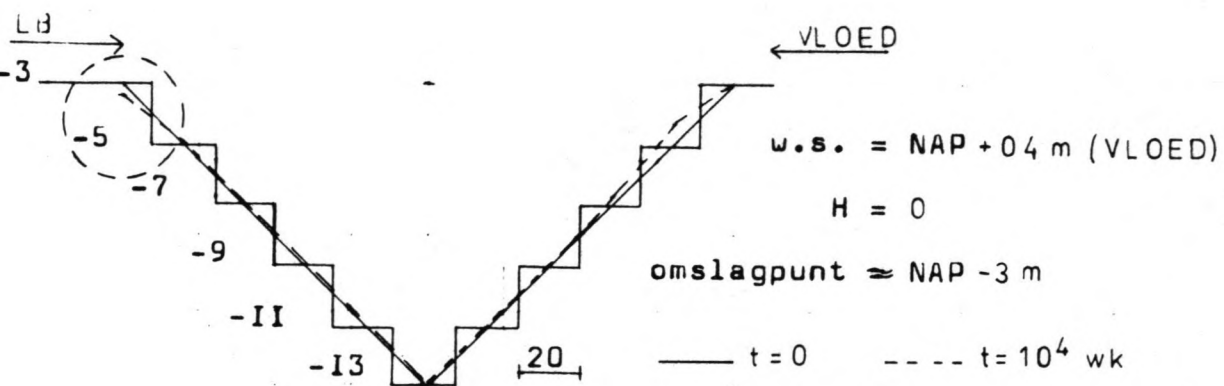
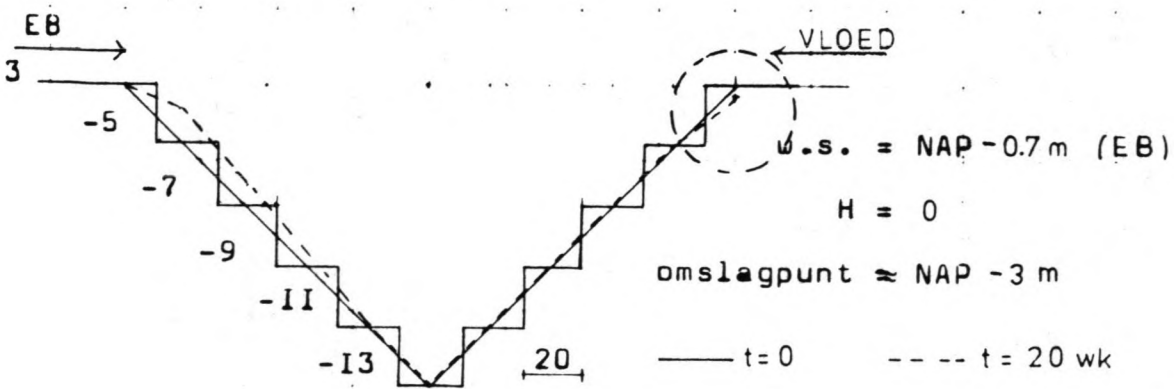
Verloop van de aanzanding van de winput  
 voor  $r = 0.12$  m  
 Figuur 63



$t(\text{wk})$	$h(\text{m})$ to.o. NAP
1	12.53
6	10.9
11	9.82
14	8.85

$t(\text{wk})$	$h(\text{m})$ to.o. NAP
1	-12.28
4	10.85
7	9.44
9	8.69

Verhoging van het diepste punt van de winput in de tijd      Figuur 64



LIGGING OMSLAGPUNT AANZANDING/EROSIE MET EN ZONDER GOLVEN  
 BIJ EB EN BIJ VLOED VOOR  $r = 0.03$  m